



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



**VARIACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LA
CAPTURA INCIDENTAL DE TIBURONES
PELÁGICOS EN EL OCÉANO PACÍFICO
ORIENTAL TROPICAL Y SU RELACIÓN CON
FACTORES OCEANOGRÁFICOS**

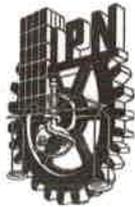
TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

PRESENTA

RAÚL CRUZ COSÍO

LA PAZ B.C.S. JULIO DE 2018



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARIA 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 28 del mes de Mayo del 2018 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis titulada:

"VARIACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LA CAPTURA INCIDENTAL DE TIBURONES PELÁGICOS EN EL OCÉANO PACÍFICO ORIENTAL TROPICAL Y SU RELACIÓN CON FACTORES OCEANOGRÁFICOS"

Presentada por el alumno:

CRUZ Apellido paterno	COSIO materno	RAUL nombre(s)
		Con registro: B 1 6 0 6 5 1

Aspirante de:

MAESTRIA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

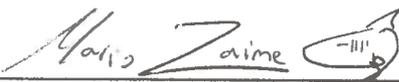
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Directores de Tesis



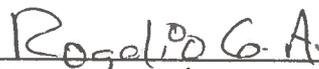
DR. FELIPE GALVÁN MAGAÑA
Director de Tesis



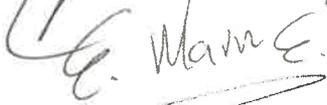
DR. MARIO JAIME RIVERA
2º. Director de Tesis



DR. CASIMIRO QUIÑONEZ VELÁZQUEZ

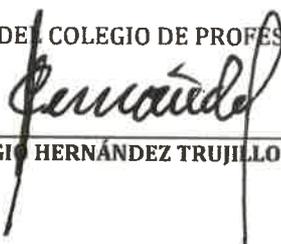


DR. ROGELIO GONZÁLEZ ARMAS



DR. EMIGDIO MARÍN ENRÍQUEZ

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



DR. SERGIO HERNÁNDEZ TRUJILLO



I.P.N.
CICIMAR
DIRECCIÓN



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

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 11 del mes de Junio del año 2018

El (la) que suscribe BM. RAÚL CRUZ COSIO Alumno (a) del Programa

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

con número de registro B160651 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DR. FELIPE GALVÁN MAGAÑA Y DR. MARIO JAIME RIVERA

y cede los derechos del trabajo titulado:

"VARIACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LA CAPTURA INCIDENTAL DE TIBURONES PELÁGICOS

EN EL OCÉANO PACÍFICO ORIENTAL TROPICAL Y SU RELACIÓN CON FACTORES OCEANOGRÁFICOS"

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: cosioraul.10@gmail.com - galvan.felipe@gmail.com - carcharodonmaritus@yahoo.com.mx

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

BM. RAÚL CRUZ COSIO

Nombre y firma del alumno

DEDICATORIA

A mis padres, Eva A. Cosío Cota y Raúl Cruz Chávez. Gracias por brindarme su apoyo incondicional durante esta etapa y en todos los aspectos de mi vida, por confiar en mí y motivarme a salir adelante. Este logro es de los tres, ¡los quiero!

AGRADECIMIENTOS

A CICIMAR-IPN, por aceptarme en su programa de posgrado y por permitirme crecer a nivel personal y profesionalmente.

A CONACYT, por el apoyo económico brindado durante los dos años de maestría.

Un agradecimiento especial al Dr. Emigdio Marín Enríquez, por formar parte de mi comité asesor y por su invaluable ayuda para la elaboración de este trabajo, por compartir conmigo su amistad y conocimientos de programación, estadística y oceanografía.

A mi director, el Dr. Mario Jaime Rivera por su apoyo incondicional a nivel personal y académico durante esta etapa de mi formación profesional.

A mi director, el Dr. Felipe Galván Magaña por aceptarme como su estudiante y por sus consejos a nivel académico.

A los profesores investigadores, Dr. Rogelio González Armas y el Dr. Casimiro Quiñónez Velázquez, por formar parte de mi comité y por sus aportaciones para mejorar este trabajo.

Al Dr. David Alfaro Siqueiros Beltrones, por su apoyo al inicio de este proceso.

CONTENIDO

GLOSARIO.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES.....	3
II.1. Generalidades de <i>Carcharhinus falciformis</i>	3
II.2. Generalidades de <i>Carcharhinus longimanus</i>	3
II.3. Generalidades de <i>Sphyrna lewini</i>	4
II.4. Generalidades de <i>Sphyrna zygaena</i>	5
II.5. Relación de las capturas de distintas especies de tiburones con algunas variables oceanográficas	5
III. JUSTIFICACIÓN.....	8
IV. HIPÓTESIS	9
V. OBJETIVO GENERAL	10
V.1 OBJETIVOS PARTICULARES	10
VI. ÁREA DE ESTUDIO.....	11
VII. MATERIAL Y MÉTODOS	14
VII.1 Base de datos	14
VII.1.1. Variables ambientales.....	14
VII.2. Descripción espacial y temporal del esfuerzo de pesca	15
VII.3. Descripción de la captura incidental de tiburones.....	15
VII.4. Tendencia de la captura incidental por unidad de esfuerzo.....	16
VII.5. Descripción espacial y temporal de la captura incidental por unidad de esfuerzo.....	17
VII.6. Caracterización ambiental del área de estudio	17
VII.7. Relación entre la CIPUE y las variables ambientales.....	17
VII.8. Modelación de la ocurrencia de las especies de tiburones más representativas de la captura incidental	17

VII.9. Predicciones y detección de hotspots.....	20
VIII. RESULTADOS	21
VIII.1. Descripción espacial y temporal del esfuerzo de pesca	21
VIII.2. Descripción de la captura incidental de tiburones.....	23
VIII.3. Tendencia de la captura incidental por unidad de esfuerzo.....	25
VIII.4. Descripción espacial y temporal de la CIPUE	26
VIII.4.1. <i>Carcharhinus falciformis</i>	26
VIII.4.2. <i>Carcharhinus longimanus</i>	27
VIII.4.3. <i>Sphyrna lewini</i>	28
VIII.4.4. <i>Sphyrna zygaena</i>	30
VIII.5. Caracterización ambiental del área de estudio	31
VIII.5.1. Temperatura superficial del mar	31
VIII.5.2. Concentración de clorofila-a	32
VIII.6. Relación entre la CIPUE y la TSM.....	34
VIII.6.1 <i>Carcharhinus falciformis</i>	34
VIII.6.2. <i>Carcharhinus longimanus</i>	36
VIII.6.3. <i>Sphyrna lewini</i>	37
VIII.6.4 <i>Sphyrna zygaena</i>	38
VIII.7. Relación entre la CIPUE y la Chl-a	39
VIII.7.1. <i>Carcharhinus falciformis</i>	39
VIII.7.2. <i>Carcharhinus longimanus</i>	40
VIII.7.3. <i>Sphyrna lewini</i>	41
VIII.7.4. <i>Sphyrna zygaena</i>	42
VIII.8 Modelación de la ocurrencia de las especies de tiburones más representativas de la captura incidental	43
VIII.8.1 <i>Carcharhinus falciformis</i>	43
VIII.8.2 <i>Carcharhinus longimanus</i>	44
VIII.8.3 <i>Sphyrna lewini</i>	46
VIII.8.4 <i>Sphyrna zygaena</i>	48
VIII.9. Predicciones y detección de hotspots.....	50
VIII.9.1 <i>Carcharhinus falciformis</i>	50
VIII.9.2 <i>Carcharhinus longimanus</i>	52
VIII.9.3 <i>Sphyrna lewini</i>	54

VIII.9.4 <i>Sphyrna zygaena</i>	56
IX. DISCUSIÓN.....	60
IX.1. Descripción espacial y temporal del esfuerzo de pesca	60
IX.2. Descripción de la captura incidental de tiburones.....	61
IX.3. Tendencia de la captura incidental por unidad de esfuerzo.....	62
IX.4. Descripción de la distribución espacial y temporal de la CIPUE	64
IX.5. Caracterización ambiental del área de estudio	68
IX.5.1. Temperatura superficial del mar	68
IX.5.2. Concentración de clorofila-a	70
IX.6. Relación entre la CIPUE y las variables ambientales.....	72
IX.7. Modelación de la ocurrencia de las especies y predicciones	75
X. CONCLUSIONES	82
XII. BIBLIOGRAFÍA.....	85

GLOSARIO

Advección.- En oceanografía se aplica al transporte horizontal de un fluido y sus propiedades.

Captura incidental.- Captura total de las especies no objetivo.

Captura incidental por unidad de esfuerzo.- Medida pesquera de abundancia relativa expresada en el número de organismos capturados incidentalmente divididos entre el esfuerzo pesquero (número de lances realizados).

Concentración de clorofila-a.- Cantidad de clorofila-a en mg por m³ de agua.

Correlación cruzada.- Análisis estadístico que mide los movimientos y proximidad de la alineación entre dos series de tiempo diferentes.

Estenotópica.- Especie que es incapaz de tolerar el cambio drástico de los factores ambientales.

Indicador de pesca.- Elemento utilizado para detectar a un cardumen de atún. Dichos cardúmenes tienden a asociarse a un indicador: delfines, objetos flotantes o no asociados-brisa (cardúmenes libres).

Modelos aditivos generalizados.- Modelos estadísticos, en los que el predictor lineal (variable respuesta) está dado por la suma de unas funciones suavizadoras de las covariantes (variables predictivas).

Surgencia.- Ascenso de las masas de agua profundas con alto contenido de nutrientes.

Temperatura superficial del mar.- Temperatura de los primeros milímetros de la capa superficial del océano.

Termoclina.- Capa de la columna de agua en donde la temperatura desciende bruscamente con la profundidad.

Transporte de Ekman.- Movimiento de las capas de agua en un ángulo de 90° con respecto a la dirección del viento, hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur ocasionado por el efecto de Coriolis.

Vientos alisios.- Sistema de vientos relativamente constantes en dirección y velocidad que soplan en ambos hemisferios, desde los 30° de latitud hacia el Ecuador con dirección noreste en el hemisferio norte y sureste en el hemisferio sur.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Circulación de las masas de agua en el OPO.....	13
Figura 2. Tendencia promedio anual de lances realizados sobre el indicador de pesca objetos flotantes por la flota atunera internacional en el OPO durante 1993-2015.....	21
Figura 3. Distribución espacial de los lances realizados sobre el indicador de pesca objetos flotantes por la flota atunera internacional en el OPO durante 1993-2015. A) Trimestre I, B) Trimestre II, C) Trimestre III, D) Trimestre IV.....	23
Figura 4. Composición porcentual del número de tiburones capturados incidentalmente por la flota atunera internacional en el OPO durante 1993-2015.....	24
Figura 5. Series de tiempo de la CIPUE (núm. Organismos/núm. lances) de tiburones en el OPO durante 1993-2015. (a) <i>Carcharhinus falciformis</i> , (b) <i>Carcharhinus longimanus</i> , (c) <i>Sphyrna lewini</i> , (d) <i>Sphyrna zygaena</i>	26
Figura 6. Distribución espacial de la CIPUE (núm. Organismos/núm. lances) de <i>Carcharhinus falciformis</i> en el OPO durante 1993-2015. A) Trimestre I, B) Trimestre II, C) Trimestre III, D) Trimestre IV.....	27
Figura 7. Distribución espacial de la CIPUE (núm. Organismos/núm. lances) de <i>Carcharhinus longimanus</i> en el OPO durante 1993-2015. A) Trimestre I, B) Trimestre II, C) Trimestre III, D) Trimestre IV.....	28
Figura 8. Distribución espacial de la CIPUE (núm. Organismos/núm. lances) de <i>Sphyrna lewini</i> en el OPO durante 1993-2015. A) Trimestre I, B) Trimestre II, C) Trimestre III, D) Trimestre IV.....	29
Figura 9. Distribución espacial de la CIPUE (núm. Organismos/núm. lances) de <i>Sphyrna zygaena</i> en el OPO durante el periodo 1993-2015. A) Trimestre I, B) Trimestre II, C) Trimestre III, D) Trimestre IV.....	30

Figura 10. Variación de la TSM (°C) en el OPO durante 2003-2015. A) Trimestre I, B) Trimestre II, C) Trimestre III, D) Trimestre IV.....	32
Figura 11. Variación de la Chl-a (mg m ⁻³) en el OPO durante 2003-2015. A) Trimestre I, B) Trimestre II, C) Trimestre III, D) Trimestre IV.....	34
Figura 12. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (núm. organismos/núm. lances) de <i>Carcharhinus falciformis</i> y la TSM (°C) promedio mensual en el OPO durante 2003-2015.....	35
Figura 13. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (núm. organismos/núm. lances) de <i>Carcharhinus longimanus</i> y la TSM (°C) promedio mensual en el OPO durante 2003-2015.....	36
Figura 14. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (núm. organismos/núm. lances) de <i>Sphyrna lewini</i> y la TSM (°C) promedio mensual en el OPO durante 2003-2015.....	37
Figura 15. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (núm. organismos/núm. lances) de <i>Sphyrna zygaena</i> y la TSM (°C) promedio mensual en el OPO durante 2003-2015.....	38
Figura 16. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (núm. organismos/núm. lances) de <i>Carcharhinus falciformis</i> y la Chl-a (mg m ⁻³) promedio mensual en el OPO durante 2003-2015.....	39
Figura 17. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (núm. organismos/núm. lances) de <i>Carcharhinus longimanus</i> y la Chl-a (mg m ⁻³) promedio mensual en el OPO durante 2003-2015.....	40
Figura 18. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (núm. organismos/núm. lances) de <i>Sphyrna lewini</i> y la Chl-a (mg m ⁻³) promedio mensual en el OPO durante 2003-2015.....	41

Figura 19. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (núm. organismos/núm. lances) de <i>Sphyrna zygaena</i> y la Chl-a (mg m ⁻³) promedio mensual en el OPO durante 2003-2015.....	42
Figura 20. Figura de efectos parciales del modelo de ocurrencia de <i>Carcharhinus falciformis</i>	44
Figura 21. Figura de efectos parciales del modelo de ocurrencia de <i>Carcharhinus longimanus</i>	46
Figura 22. Figura de efectos parciales del modelo de ocurrencia de <i>Sphyrna lewini</i>	48
Figura 23. Figura de efectos parciales del modelo de ocurrencia de <i>Sphyrna zygaena</i>	50
Figura 24. Mapas estacionales de predicción de probabilidad de ocurrencia del modelo GAM ajustado a la presencia/ausencia de <i>Carcharhinus falciformis</i> para el periodo 2003-2015. Los contornos representan las áreas consideradas como hotspots (>95% del cuantil del vector de predicción).....	51
Figura 25. Distribución de frecuencias de las celdas consideradas hotspots (>95% del cuantil) de <i>Carcharhinus falciformis</i> para la TSM (a), Chl-a (b), ONI (c), longitud (d) y latitud (e).....	52
Figura 26. Mapas estacionales de predicción de probabilidad de ocurrencia del modelo GAM ajustado a la presencia/ausencia de <i>Carcharhinus longimanus</i> para el periodo 2003-2015. Los contornos representan las áreas consideradas como hotspots (>95% del cuantil del vector de predicción).....	53
Figura 27. Distribución de frecuencias de las celdas consideradas hotspots (>95% del cuantil) de <i>Carcharhinus longiamus</i> para la TSM (a), Chl-a (b), ONI (c), longitud (d) y latitud (e).....	54
Figura 28. Mapas estacionales de predicción de probabilidad de ocurrencia del modelo GAM ajustado a la presencia/ausencia de <i>Sphyrna lewini</i> para el periodo	

2003-2015. Los contornos representan las áreas consideradas como hotspots (>95% del cuantil del vector de predicción).....55

Figura 29. Distribución de frecuencias de las celdas consideradas hotspots (>95% del cuantil) de *Sphyrna lewini* para la TSM (a), Chl-a (b), ONI (c), longitud (d) y latitud (e).....56

Figura 30. Mapas estacionales de predicción de probabilidad de ocurrencia del modelo GAM ajustado a la presencia/ausencia de *Sphyrna zygaena* para el periodo 2003-2015. Los contornos representan las áreas consideradas como hotspots (>95% del cuantil del vector de predicción).....57

Figura 31. Distribución de frecuencias de las celdas consideradas hotspots (>95% del cuantil) de *Sphyrna zygaena* para la TSM (a), Chl-a (b), ONI (c), longitud (d) y latitud (e).....58

Figura 32. Traslape de hotspots de *Carcharhinus falciformis* (CF), *Carcharhinus longimanus* (CL), *Sphyrna lewini* (SL) y *Sphyrna zygaena* (SZ) en el OPO.....59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Captura incidental por unidad de esfuerzo (CIPUE) de las cuatro especies principales en la captura.....	25
Tabla II. Resumen de las variables explicativas utilizadas para modelar la ocurrencia de <i>C. falciformis</i> en el OPO durante el periodo 2003-2015.....	43
Tabla III. Resumen de las variables explicativas utilizadas para modelar la ocurrencia de <i>C. longimanus</i> en el OPO durante el periodo 2003-2015.....	45
Tabla IV. Resumen de las variables explicativas utilizadas para modelar la ocurrencia de <i>S. lewini</i> en el OPO durante el periodo 2003-2015.....	47
Tabla V. Resumen de las variables explicativas utilizadas para modelar la ocurrencia de <i>S. zygaena</i> en el OPO durante el periodo 2003-2015.....	49

RESUMEN

La movilidad y distribución de las poblaciones de tiburones pelágicos son consecuencia de la variación en el ambiente. Estas variaciones juegan un papel importante en la disponibilidad del recurso, lo cual trae consigo cambios en la tasa de explotación. El análisis de la captura incidental de tiburones pelágicos permite estudiar los movimientos de sus poblaciones en el Océano Pacífico Oriental (OPO) tropical. En este trabajo se relacionó la variación espacio-temporal de las capturas incidentales de tiburones en el OPO, reportadas por observadores científicos durante 1993-2015 de la Comisión Inter-Americana del Atún Tropical a bordo de barcos atuneros que pescan con red de cerco, con la temperatura superficial del mar (TSM) y la clorofila-a (Chl-a). La información analizada incluye el número de lances, el número de organismos capturados asociados a objetos flotantes, por especie, mes, año y coordenadas geográficas. Las variables ambientales fueron inferidas a través de imágenes satelitales. Las especies más capturadas fueron *Carcharhinus falciformis*, *Carcharhinus longimanus*, *Sphyrna lewini* y *Sphyrna zygaena*, las cuales están catalogadas como vulnerables y en peligro de extinción dentro de la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN por sus siglas en inglés). La captura incidental por unidad de esfuerzo (CIPUE) de *C. longimanus* mostró una tendencia en declive mientras que en las otras tres especies la tendencia aumentó. Mediante el uso de los modelos aditivos generalizados (GAMs por su acrónimo en inglés) se determinó el modelo predictivo para cada especie. Los resultados sugieren que la TSM es la variable ambiental que más explica la variabilidad de las capturas en el OPO. El modelo predice zonas con alta probabilidad de ocurrencia (hotspots) principalmente en zonas costeras para *S. lewini*; en zonas oceánicas para *C. falciformis* y *C. longimanus*; y en ambas zonas para *S. zygaena*.

ABSTRACT

The mobility and distribution of pelagic shark populations are a consequence of the variation in the environment. These variations play an important role in the availability of the resource, which brings with it changes in the rate of exploitation. The analysis of the incidental catch of pelagic sharks allows us to study the movements of their populations in the tropical eastern Pacific Ocean (EPO). In this work, we sought to relate the spatio-temporal variation of shark's incidental catch in the EPO, reported by scientific observers during 1993-2015 of the Inter-American Tropical Tuna Commission on tuna fishing boats fishing with purse seine, with sea surface temperature (SST) and chlorophyll-a (Chl-a). The information analyzed includes the number of sets, the number of captured organisms associated with floating objects, by species, month, year and geographic coordinates. The environmental variables were inferred through satellite images. The most captured species were *Carcharhinus falciformis*, *Carcharhinus longimanus*, *Sphyrna lewini* and *Sphyrna zygaena*, all classified as vulnerable and endangered within the red list of the International Union for the Conservation of Nature (IUCN). The incidental catch per unit of effort showed a declining trend for *C. longimanus* and an increase for the other species. We modeled the probability of occurrence of each one of the four shark species as a function of environmental, spatial and temporal variables using Generalized Additive Models (GAMs). The results suggest that SST is the environmental variable that most accounts for most of the variation in the occurrence of the different shark species. The model predicts areas with high probability of occurrence (hotspots) mainly in coastal areas for *S. lewini*. *Carcharhinus falciformis* and *C. longimanus* are more likely to be found in oceanic zones, while for *S. zygaena* in both zones.

I. INTRODUCCIÓN

La captura incidental de tiburones representa hasta el 50 % del total de los desembarques a nivel mundial (Stevens *et al.*, 2000), motivo por el cual la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN por sus siglas en inglés) la identifica como una de las principales causas de disminución de las poblaciones de tiburones (Lewison *et al.*, 2004).

En el Océano Pacífico Oriental (OPO) tropical, en la pesca comercial de atún con red de cerco se captura incidentalmente un número elevado de tiburones, principalmente en los lances realizados sobre objetos flotantes como troncos, ballenas muertas etc. o dispositivos diseñados para agregar peces, conocidos como FADs (Fish Aggregating Devices) donde predominan organismos juveniles (Solana-Sansores, 2001a). La captura desmedida de depredadores topo como lo son algunas especies de tiburones pelágicos provoca cambios en la estructura de la red trófica y reducción del tamaño poblacional (Huang y Liu, 2010).

En mar abierto, los cambios en las condiciones oceanográficas son causa de la movilidad y distribución amplia de las especies de organismos pelágicos mayores. Tradicionalmente se ha inferido que la temperatura del mar es la variable que más afecta en la distribución y abundancia de las diferentes especies de elasmobranchios (Castro-Aguirre, 1983; Tovar, 2000). Sin embargo, debido a la complejidad en la obtención de datos de la columna de agua para áreas extensas se ha utilizado la temperatura superficial del mar como un indicador oceanográfico con la finalidad de documentar una asociación entre estos organismos y dicha variable ambiental (Klimley, 1988; Jaime-Rivera, 2004). Por otro lado, se sabe que en zonas de alta productividad primaria se concentra una gran cantidad de depredadores, sin embargo, podría existir un desfase espacio-temporal desde la producción primaria hasta los niveles tróficos más elevados, por lo que estos afloramientos son aprovechados por los depredadores tope con un desfase de 4 a 5 meses (Jaime-Rivera, 2004; Martínez-Rincón, 2005; Marín-Enríquez, 2012).

Actualmente se ha incrementado el uso de diferentes herramientas estadísticas con el fin de comprender la relación que existe entre la distribución de los organismos

pelágicos y el ambiente en el que se desarrollan, y realizar predicciones aún en zonas donde no existe esfuerzo de muestreo. Los modelos aditivos generalizados (GAMs por su acrónimo en inglés) son una de las técnicas que han sido utilizadas con este fin (Leathwick *et al.*, 2006). Esta técnica explora relaciones del tipo no lineales, y además puede funcionar con datos que presentan distribuciones diferentes a la distribución “normal” conocida como Gaussiana (Martínez-Rincón, 2012).

El buen manejo de las diferentes especies de tiburones pelágicos en el OPO radica en gran medida en el conocimiento de su distribución y las variables ambientales que la afectan (Martínez-Rincón, 2012). El tiburón piloto, *Carcharhinus falciformis*; el tiburón puntas blancas oceánico, *Carcharhinus longimanus*; y los tiburones martillo *Sphyrna lewini* y *Sphyrna zygaena* son las cuatro especies de tiburones capturadas con más frecuencia incidentalmente en la pesca de atún con red de cerco asociados a objetos flotantes. Es importante mencionar que estas especies se encuentran catalogadas dentro de la lista roja de la IUCN en diferentes estatus de protección. Dada la importancia que presentan para los ecosistemas marinos y la economía de diferentes países, se pretende aportar información de utilidad para su conservación.

II. ANTECEDENTES

Existen distintos trabajos en los que se han realizado aportes importantes en la biología/ecología y aspectos pesqueros de algunas especies de tiburones en el OPO. A continuación se describen algunos de estos trabajos.

II.1. Generalidades de *Carcharhinus falciformis*

Compagno (1984) y Last y Stevens (1994) describen a *C. falciformis* como una especie migratoria que está presente en hábitats costeros y oceánicos tropicales a temperaturas que superan los 23°C. En el OPO se distribuye desde las costas de California hasta Perú. Habita principalmente en la zona oceánica hasta los 500 m de profundidad, aunque también se ha observado en zonas costeras a partir de los 18 m (Compagno, 1990).

Bonfil *et al.* (2008a) y Compagno (1984) describen a esta especie como un depredador oportunista que se alimenta principalmente de peces teleósteos –entre los que se encuentra el atún aleta amarilla–, calamares y cangrejos pelágicos.

La fecundidad de *C. falciformis* ha sido estimada de 6 a 12 crías en promedio, aunque existen reportes de hasta 16. Es una especie que alcanza su madurez sexual entre los 5 y 7 años, presenta un ciclo reproductivo bienal, que abarca un año de gestación y un año de reposo (Cadena-Cárdenas, 2001; Oshitani *et al.*, 2003; Sánchez de Ita *et al.*, 2011). Su talla de nacimiento es de 64-78 cm de longitud total y una talla máxima de 330 cm (Garrick, 1982; Bonfil *et al.*, 1993).

Nuevamente, Bonfil *et al.* (2008a) mencionan que *C. falciformis* es uno de los tiburones más capturados en diferentes pesquerías tropicales, y a pesar 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 su manejo y conservación óptimos.

II.2. Generalidades de *Carcharhinus longimanus*

Compagno (1984) documenta que *C. longimanus* se distribuye en aguas tropicales y subtropicales entre los 30°N y 35°S. En el OPO, su distribución va desde el sur de California en Estados Unidos hasta Perú, incluyendo las islas Galápagos. Es una

especie que presenta hábitos oceánicos y su abundancia se incrementa conforme se aleja de la plataforma continental (Backus *et al.*, 1956; Compagno, 1984). A pesar de habitar zonas de aguas profundas, la distribución vertical de la especie no supera los 100 m de profundidad y posee una preferencia por habitar en aguas cálidas que rebasan los 20 °C, aunque se han reportado capturas en intervalos de temperatura de los 18 a los 28 °C (Bonfil *et al.*, 2008b; Compagno, 1984).

Se considera como uno de los principales depredadores de mar abierto, el cual se alimenta principalmente de peces teleósteos incluyendo atunes y cefalópodos oceánicos, aunque también ha depredado sobre aves marinas, tortugas y mamíferos marinos (Compagno, 1984).

La fecundidad reportada es de 1 a 15 crías por evento reproductivo, sin embargo el promedio es de 5 a 6 crías por camada. Presenta una madurez sexual de entre 4 y 5 años, un ciclo reproductivo bienal con periodos de nacimientos en años alternados y un periodo de gestación de 10 a 12 meses (Bonfil *et al.*, 2008b, Defenders of Wildlife, 2015). Nakano (1996) menciona que esta especie era considerada junto con el tiburón azul, *Prionace glauca* como una de las más abundantes en el OPO, sin embargo se han reportado grandes disminuciones de sus poblaciones debido a su sobre explotación (Bonfil *et al.*, 2008b).

II.3. Generalidades de *Sphyrna lewini*

Es una especie que se distribuye globalmente a través de océanos tropicales y templados. En el OPO, su distribución se ha reportado desde el sur de California y el golfo de California hasta posiblemente el norte de Perú. Es considerado un tiburón pelágico costero y semi-oceánico (Compagno, 1984). Los juveniles suelen habitar en bahías poco profundas y estuarios cerrados mientras que los adultos se encuentran de manera frecuente sobre plataformas continentales e insulares y en aguas profundas adyacentes a ellas de hasta al menos 275 m de profundidad. En cuanto a su comportamiento, se ha observado que esta especie llega a formar cardúmenes de más de 100 individuos cerca de montes submarinos e islas oceánicas (Klimley, 1987). Se trata de una especie con un espectro trófico amplio, en donde sus presas principales son algunas especies de peces e invertebrados -especialmente

cefalópodos- (Clarke, 1971). Se ha reportado una fecundidad promedio de 30 embriones, una madurez sexual de entre 6 y 15 años con variación entre sexos y localidades y presenta un ciclo reproductivo de un año (Torres-Huerta, 1999; Anislado-Tolentino, 2000; Zarate-Rustrián, 2010; Branstetter, 1987 y Carrera-Fernández, 2011).

II.4. Generalidades de *Sphyrna zygaena*

Los estudios biológicos realizados para esta especie son escasos a nivel mundial. Se distribuye en todos los océanos del mundo, en aguas tropicales y templadas tanto en zonas costeras como en el océano abierto. En el OPO, su distribución se extiende desde California hasta Chile (Compagno 1984). Es una especie estenotópica, la cual se ve limitada principalmente por la temperatura del mar. Con respecto a su alimentación, esta consiste principalmente de peces óseos, camarones, cangrejos y cefalópodos. Al igual que *S. lewini*, esta especie puede formar cardúmenes de cientos de individuos (Castro 1983). Presenta un periodo de gestación de 10 a 12 meses, con camadas de 15 a 35 crías, seguido de un año de descanso (Álava, 2009).

II.5. Relación de las capturas de distintas especies de tiburones con algunas variables oceanográficas

Brenes *et al.* (2000) analizaron los datos de tiburones capturados con palangre dentro de la zona económica exclusiva de Nicaragua, más allá de las 90 millas náuticas a partir de la costa durante 1995-1997. Los resultados obtenidos en este estudio muestran una clara relación entre las capturas del tiburón *C. falciformis*, *P. glauca*, el tiburón zorro *Alopias vulpinus*, y *S. lewini* con la temperatura superficial del mar (TSM). Al comparar el tiburón piloto y el tiburón azul, éstos mostraron un patrón inverso entre sí. Para la primera especie el aumento de individuos ocurrió conforme al aumento térmico, mientras que para el tiburón azul, el número de individuos disminuyó conforme la temperatura del agua se incrementaba. El tiburón zorro

mostró un comportamiento en el cual la tendencia general es un aumento del número de individuos con la temperatura, sobre todo a partir de los 20°C.

El mayor porcentaje de capturas de *C. falciformis* se dio entre los 26° y 28°C, para *P. glauca* entre 27° y 27.4°C, mientras que para *A. vulpinus* y *S. lewini* las capturas fueron mayores entre los 25° y 27°C y 26.8° y 27.8°C respectivamente.

Mediante la aplicación de regresiones lineales, Jaime-Rivera (2004) buscó una posible relación entre la disponibilidad de captura de los tiburones *P. glauca*, el tiburón mako *Isurus oxyrinchus* y *C. falciformis* con la TSM y la concentración de clorofila-a (Chl-a) para los datos reportados por barcos palangreros de la pesquería dirigida de tiburones en la costa occidental de Baja California Sur durante 1996-2001. Los resultados sugieren que la Chl-a no fue un buen indicador para la captura de ninguna de las tres especies estudiadas; se infirió que valores de TSM de 18° a 22°C y de 24° a 27°C pueden ser utilizados como buenos indicadores de la probabilidad de encuentro de *P. glauca* y *C. falciformis* respectivamente. Por otro lado, no se encontró una relación entre la TSM y las capturas del tiburón mako.

Martínez-Rincón (2012) analizó datos de la captura incidental de peces pelágicos mayores reportada por observadores a bordo de la flota atunera mexicana en el OPO durante 1998-2007. El objetivo de este trabajo fue comparar el poder predictivo de los GAMs y los árboles de regresión impulsados. Dentro de las diferentes especies analizadas, se incluyó al marlín azul *Makaira nigricans*, marlín negro *Makaira indica*, marlín rayado *Kajikia audax*, pez vela *istiophorus platypterus*, dorado *Corhyphaena spp.*, wahoo *Acanthocybium solandri*, *C. falciformis* y *C. longimanus* para realizar una exploración de la relación que poseen estos organismos con diferentes variables ambientales. Los resultados muestran que las variables ambientales que presentaron un mayor efecto sobre las capturas de las diferentes especies fueron la TSM, Chl-a y el índice oceánico del Niño (ONI por sus siglas en inglés). En este estudio se infirió que la probabilidad de ocurrencia de los pelágicos mayores estudiados es mayor a temperaturas superiores a los 20°C, durante eventos La Niña y bajos niveles de Chl-a. Así mismo, los resultados obtenidos indicaron que los GAMs reconocieron con

mejor precisión la estructura espacial de todas las especies, mientras que los árboles de regresión impulsados presentaron un mejor desempeño predictivo.

Santana-Hernández *et al.* (2013) analizaron los datos de captura de *C. longimanus* en la pesquería de mediana altura del Pacífico central mexicano, obtenidos a bordo de barcos palangreros en Manzanillo durante 2003-2011. Para explicar las variaciones de abundancia de la especie se utilizó una correlación de Spearman entre la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) y la temperatura; y nuevamente entre la CPUE y la distancia desde la costa al sitio de pesca. Estos autores encontraron que más del 75% de los individuos fueron capturados en distancias superiores a las 100 millas náuticas a partir de la línea de costa. Por otro lado, los valores más altos de CPUE se obtuvieron durante mayo cuando la TSM promedio fue de 28°C y mencionan que es probable que *C. longimanus* sea más abundante durante julio a octubre.

Lezama-Ochoa *et al.* (2016) relacionaron diferentes variables ambientales con las capturas incidentales de *C. falciformis*, datos reportados por la CIAT en el Océano Índico, Atlántico y el OPO, mediante modelos de “habitat suitability” (MaxEnt). Los autores reportaron que la variable que más influyó en la presencia de la especie, fue la TSM (26 a 30°C) y concluyeron que el hábitat potencial de distribución se ubica en áreas cercanas a algunos afloramientos costeros y ecuatoriales asociados principalmente con la TSM.

III. JUSTIFICACIÓN

Algunas investigaciones relativamente recientes sugieren que existe un decremento en las capturas dirigidas e incidentales de algunas especies de tiburones debido a la sobrepesca y otros factores. Este suceso se ha manifestado en diversas pesquerías comerciales alrededor del mundo, por lo que se ha convertido en un tema alarmante debido a los efectos negativos que trae consigo a los ecosistemas marinos (Bodiguel *et al.*, 2009; Friedlander y Demartini, 2002). Debido a esto, es necesario diseñar estrategias de conservación para este grupo de especies, las cuales dependen en primera instancia del conocimiento básico de su distribución geográfica y las condiciones ambientales que afectan directa o indirectamente a su distribución. Por lo tanto, el análisis de bases de datos históricas de captura incidental puede ayudar a entender mejor las características biológicas y ecológicas que modulan la distribución y abundancia de las distintas poblaciones de tiburones migratorios en el OPO, con la finalidad de caracterizar zonas de agregación de las diferentes especies. Esto puede ser útil en el diseño de estrategias pesqueras que ayuden a minimizar la captura incidental.

IV. HIPÓTESIS

Con base al conocimiento previo que se tiene acerca de las especies de tiburones capturadas incidentalmente en la pesquería de atún con red de cerco, en el presente trabajo se plantea la siguiente hipótesis: la distribución de los tiburones capturados en el OPO por la flota atunera internacional se verá influenciada significativamente por la TSM y la Chl-a.

Por otro lado, distintos autores han sugerido un decremento en la captura de distintas especies de tiburones, por lo que se plantea la hipótesis de que las series de tiempo de captura incidental de tiburones analizadas en la presente tesis presentan un decremento estadísticamente significativo.

V. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la variación espacio temporal de la captura incidental de tiburones capturados sobre objetos flotantes, y su relación con la temperatura superficial del mar, concentración de clorofila y el índice oceánico de El Niño

V.1 OBJETIVOS PARTICULARES

- Describir la variación espacial y temporal del esfuerzo pesquero.
- Describir la composición de la captura incidental de tiburones en la pesquería de atún con red de cerco con el fin de determinar las especies más representativas para su posterior análisis.
- Evaluar la tendencia de las series de tiempo de la captura incidental por unidad de esfuerzo (CIPUE).
- Describir la variación espacial y temporal de la CIPUE.
- Caracterizar el área de estudio desde un punto de vista ambiental (meso y macro escala).
- Cuantificar la relación entre las series de tiempo de la CIPUE y las variables ambientales (TSM y Chl-a).
- Modelar las capturas incidentales de tiburones en función de las variables ambientales (TSM, Chl-a, y ONI, espaciales –latitud y longitud-, temporales –mes y año y operacionales –número de lances-).
- Detectar zonas potenciales de agregación (hotspots) de las especies más representativas de tiburones.

VI. ÁREA DE ESTUDIO

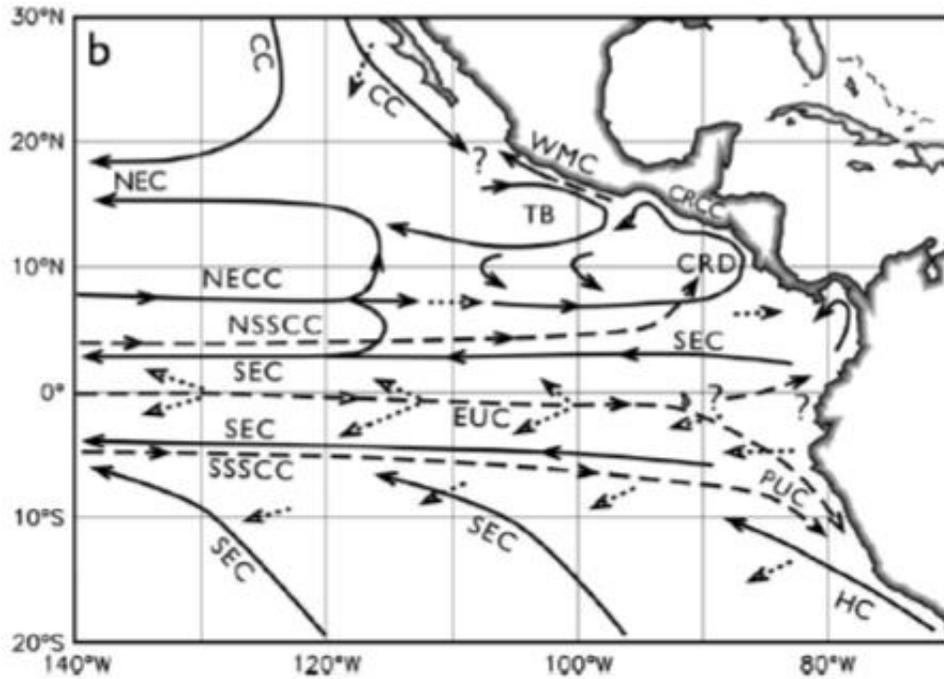
El OPO (Fig.1) comprende una zona que va desde los 20°S – 30°N y 70° – 160°O, con promedio de TSM de 23°C y con TSM mayores a 23°C entre los 3°S – 30°N, y menores a 23°C al norte y sur de esta zona (Fiedler, 1992).

La circulación superficial en el OPO presenta una variación en respuesta al desplazamiento de los principales sistemas eólicos. Los vientos alisios del norte y sur convergen entre los 5° – 10°N, lo que da origen a la zona intertropical de convergencia (ITCZ por su acrónimo en inglés), cuyo desplazamiento más al norte (10°N) ocurre de junio a noviembre (Wyrтки, 1966). El área de estudio se ve influenciada por la porción oriental y ecuatorial de los giros anticiclónicos en el norte y sur del océano Pacífico (Trasviña y Barton, 1997). Dicha porción está conformada por la corriente de California y la Corriente Norecuatorial en el Pacífico norte, y por la Corriente de Humboldt y la Corriente Surecuatorial en el Pacífico sur. Estas corrientes de frontera oriental fluyen hacia el ecuador y giran hacia el oeste, generando la circulación característica del Pacífico central. Entre estos giros, se desarrolla la Contracorriente Norecuatorial, siempre y cuando la ITCZ esté lo suficientemente lejos al norte del ecuador (Wyrтки, 1966). Su flujo va en dirección este a oeste al igual que la Corriente Subsuperficial Ecuatorial (Corriente de Cromwell), la cual fluye por debajo de la Corriente Surecuatorial (Kessler, 2006). La contracorriente Norecuatorial determina la naturaleza cálida del OPO. La corriente de Humboldt, la corriente Surecuatorial y la corriente de California son frías (Wyrтки, 1966).

En aguas oceánicas, frente a Costa Rica, la Contracorriente Norecuatorial se separa y un brazo que fluye a una velocidad que supera los 0.5 nudos, torna al norte alrededor del Domo de Costa Rica, formando la Corriente de Costera de Costa Rica, la cual alimenta a la Corriente Norecuatorial (Kessler, 2006). La porción superficial de la Corriente Costera de Costa Rica se alimenta de la Contracorriente Norecuatorial, y consiste en agua tropical superficial. Esta corriente es desviada hacia el sistema de corrientes ecuatoriales por los eventos de “Tehuano” – vientos en chorro que soplan

del golfo de México al Pacífico por el golfo de Tehuantepec –; ahí emerge una corriente subsuperficial la cual transporta las masas de agua cálidas a lo largo del Pacífico Central Mexicano, y se conoce como Corriente Costera Mexicana o Corriente Occidental Mexicana (Kessler, 2006). Este giro hacia el oeste de la Corriente Costera de Costa Rica produce un vórtice en la región, o remolino alargado, que se intensifica entre junio y septiembre debido a la influencia de la ITCZ, ubicada en esa época en su posición más norteña (Fiedler, 2002). El vórtice y la fricción de los vientos asociados a la ITCZ generan una surgencia permanente desde aguas profundas ricas en nutrientes que forman el Domo de Costa Rica, el cual se caracteriza por presentar una termoclina somera, a menos de 50 m de la superficie (Fiedler, 2002; Kessler, 2006). Además de los vientos alisios, el Domo de Costa Rica se ve influenciado por vientos en chorro provenientes del Caribe, los cuales cruzan hacia el Pacífico a través de las depresiones de la región mesoamericana: Tehuantepec-México, el Lago de Nicaragua y Panamá. El sistema de vientos principal, conocido como vientos en chorro de Papagayo, atraviesa la depresión del Lago de Nicaragua a unos 70 Km al norte del golfo de Papagayo, en Costa Rica (Fiedler, 2002). Estos vientos se adentran entre 300 y 600 km en el Océano Pacífico, formando oleajes y remolinos a lo largo de su trayectoria (Müller-Karger y Fuentes-Yaco, 2000).

Otra característica oceanográfica que se presenta en el área de estudio, ocurre en América central dónde el viento es comparativamente débil con respecto a la ITCZ. Esta estructura oceanográfica conocida como alberca de agua cálida – entre la punta de la península de Baja California y la lengua de agua fría ecuatorial (Wang y Fiedler, 2006) –, se caracteriza por presentar TSM > 27.5°C durante todo el año y constituye una provincia biogeográfica del océano abierto con una comunidad biológica distinta (Fiedler y Talley, 2006).



Corrientes subsuperficiales - - →
 Corrientes de la capa superior ———→
 Corrientes cerca de la superficie ·····→

CC = Corriente de California
 NEC = Corriente Norecuatorial
 NECC = Contra corriente Norecuatorial
 SEC = Corriente Surecuatorial
 CRCC = Corriente Costera de Costa Rica
 HC = Corriente de Humboldt
 WMC = Corriente Occidental Mexicana
 PUC = Corriente de fondo Perú-Chile
 TB = Cuenca de Tehuantepec
 CRD = Domo de Costa Rica
 NSSCC = Contracorrientes subsuperficiales Norte/Sur

Figura 1. Circulación de las masas de agua en el OPO (de Kessler, 2006).

VII. MATERIAL Y MÉTODOS

VII.1 Base de datos

La información pesquera proviene de datos recabados por los observadores a bordo de la flota atunera internacional de la Comisión Interamericana del Atún Tropical (CIAT), y corresponde a la captura incidental de tiburones realizada por buques atuneros que pescan atún con red de cerco de clase 6 – >435 m³ de capacidad de carga – (Inter-American Tropical Tuna Commission, 2009) en el OPO durante 1993-2015. La base de datos contiene información del número de lances, número de tiburones capturados por especie, combinados por mes y año, los indicadores de pesca (“no asociados”, “delfín” y “objetos flotantes”) y las coordenadas geográficas a una resolución espacial de 1° x 1°.

Se seleccionaron las cuatro especies más abundantes para realizar los posteriores análisis. Estas especies fueron *C. falciformis*, *C. longimanus*, *S. lewini* y *S. zygaena*, mismas que presentan una vulnerabilidad elevada a nivel mundial, según datos de la lista roja de la IUCN.

Debido a que más del 85% de las capturas incidentales de las cuatro especies ocurrieron a través del indicador de pesca “objetos flotantes”, se decidió descartar los otros dos indicadores (“No asociados” y “delfín”).

Todo el procesamiento de las bases de datos de capturas, variables ambientales, así como los análisis estadísticos y gráficas y/o mapas se realizaron con ayuda del software R (R Core Team, 2014).

VII.1.1. Variables ambientales

Las variables ambientales utilizadas en el estudio fueron obtenidas directamente de la página de la NOAA (<http://coastwatch.pfel.noaa.gov/erddap>). Debido a la limitación computacional de nuestro equipo y a la gran cantidad de información a procesar por lo extenso del área de estudio, se decidió descargar únicamente los datos correspondientes al periodo 2003 – 2015. Estos consistieron en los valores promedio mensuales de la TSM, obtenidos a partir de las imágenes satelitales generadas por el sensor AVHRR (Advance Very High Resolution Radiometer) con una resolución

espacial de 0.1° (código erdGAsstamday). Se utilizaron imágenes satelitales de la Chl-a, las cuales fueron generadas por el sensor Aqua MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) con una resolución espacial de 4 km (código erdMH1chlamday). Además se utilizó el ONI, que se obtiene del promedio móvil de 3 meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar que se presentan en la región Niño 3.4 (5°N – 5°S, 120° – 170°O).

Debido a que las variables ambientales se obtuvieron a una resolución espacial diferente a la base de datos, se igualó la resolución de ambas bases (pesquera y ambiental) a 1° x 1° para llevar a cabo los análisis posteriores.

VII.2. Descripción espacial y temporal del esfuerzo de pesca

Con la finalidad de representar gráficamente la distribución espacial y temporal del esfuerzo de pesca de la flota atunera internacional durante el periodo 1993–2015, se generaron mapas trimestrales con el número de lances. Los mapas corresponden a la suma de los lances en cada cuadrante de 1° x 1° por trimestre (trimestre I de enero-marzo, trimestre II de abril-junio, trimestre III de julio-septiembre y trimestre IV de octubre-diciembre).

VII.3. Descripción de la captura incidental de tiburones

Para describir la composición específica de las especies de tiburón que conforman la captura incidental en la pesquería de atún con red de cerco de la CIAT, se contabilizó el número de tiburones por especie, se obtuvo el porcentaje de cada una de ellas dentro de la captura incidental de tiburones total y se representó a través de un gráfico de pastel.

VII.4. Tendencia de la captura incidental por unidad de esfuerzo

Con el fin de eliminar el posible sesgo generado por el esfuerzo de pesca, se calculó la CIPUE mediante la siguiente relación (Marín-Enríquez, 2018).

$$CIPUE_i = \frac{Tiburones_i}{Lances_i}$$

Dónde:

$CIPUE_i$ es la captura incidental por unidad de esfuerzo

$Tiburones_i$ es el número de tiburones capturados

$Lances_i$ es el número de lances sobre objetos flotantes, todo para el i -ésimo cuadrante de pesca.

Para evaluar las posibles tendencias temporales en la CIPUE, se construyó una serie de tiempo para cada especie, calculando el promedio mensual del periodo 1993-2015 y se aplicó un ajuste lineal sobre los datos originales mediante el uso de la librería *stats* de R (R Core Team, 2014). Se probó la hipótesis de que el parámetro b (la pendiente de la recta del modelo lineal ajustado) era igual a cero, en donde valores positivos de b y diferentes de cero indican una tendencia positiva y viceversa (Polovina *et al.*, 2009; Marín-Enríquez y Muhlia-Melo, 2018). Para mejorar la interpretación visual de la serie de tiempo de la CIPUE los datos originales se suavizaron mediante la función *smooth* del paquete *stats* de R (R Core Team, 2014), la cual utiliza el método de medianas móviles de Tukey (Marín-Enríquez y Muhlia-Melo, 2018).

Para conocer el porcentaje de la tasa de cambio anual de la CIPUE de cada una de las especies analizadas, se dividió la pendiente entre el intercepto del modelo lineal ajustado y se multiplicó el resultado por 12 para convertir a una tasa anual y finalmente se multiplicó el resultado por 100 para convertirlo en porcentaje (Polovina, *et al.*, 2009).

VII.5. Descripción espacial y temporal de la captura incidental por unidad de esfuerzo

Se presenta la CIPUE de cada especie de interés mediante mapas trimestrales, con la finalidad de describir su distribución espacial y temporal. Los mapas corresponden a la suma de la CIPUE en cada cuadrante de $1^\circ \times 1^\circ$ durante cada trimestre.

VII.6. Caracterización ambiental del área de estudio

Con el propósito de describir la variación ambiental estacional que se presentó en el área de estudio durante 2003-2015, se realizaron mapas trimestrales de la TSM y la Chl-a. Los mapas corresponden al promedio mensual de cada variable ambiental para cada cuadrante de $1^\circ \times 1^\circ$ durante cada trimestre

VII.7. Relación entre la CIPUE y las variables ambientales

Con el fin de determinar el tiempo que tarda la respuesta de las especies ante las variaciones ambientales y cuantificar las posibles relaciones entre las series de tiempo de la CIPUE de cada especie y las series de tiempo de las variables ambientales (TSM, Chl-a), se aplicó un análisis de correlación cruzada. Éste análisis mide la similitud entre dos señales e identifica el retraso o desfase de tiempo entre dos variables, es decir el tiempo en el que estas dos señales coinciden (Zar, 2010). Dicho análisis se llevó a cabo mediante la función *ccf* de la librería *stats* del lenguaje R (R Core Team, 2014).

VII.8. Modelación de la ocurrencia de las especies de tiburones más representativas de la captura incidental

Para inferir el efecto que tienen las variables ambientales sobre los tiburones capturados incidentalmente en el OPO por la flota atunera, se modeló la ocurrencia de las distintas especies de tiburón, mediante el uso de modelos aditivos generalizados (GAMs por sus siglas en inglés). Para lograr este objetivo, se transformó el vector de capturas en unos y ceros (uno cuando hubo captura incidental, cero cuando no la hubo), utilizando después una transformación logística.

Con este enfoque, se modeló la probabilidad de capturar por lo menos un individuo en cada cuadrante de 1°x1°.

Este tipo de modelos se consideran como una extensión de los modelos lineales generalizados, en donde el predictor lineal está dado por la suma de unas funciones suavizadoras de las variables predictivas que dan como resultado una variable respuesta (Wood, 2006). Estas funciones son especificadas por el usuario, y están relacionadas con la variable dependiente mediante una función de enlace (Hastie y Tibshiriani, 1990). La ecuación genérica de un GAM está dada por:

$$g(\mu_i) = \mu + \sum_{j=1}^p f_j(X_i)$$

Donde:

g = función monotónica de enlace

μ_i = valor ajustado

X_i = variables predictivas

f_j = función de suavizado

La variable respuesta que se utilizó fue la presencia/ausencia (0/1) de cada especie y las variables predictivas fueron la TSM, Chl-a y el ONI -como variables ambientales-, el número de lances -como variable operacional-, el mes y año -como variables temporales- y la longitud y latitud -como variables espaciales-. Además se incluyeron las interacciones entre Longitud, Latitud y Año para tener en cuenta una posible variación espacial del esfuerzo pesquero entre años (Marín-Enríquez *et al.*, 2018).

La construcción del modelo se llevó a cabo a partir del modelo más simple o nulo hasta llegar al modelo mínimo adecuado mediante el método de paso a paso. El modelo mínimo adecuado es aquel que contiene las variables más importantes para explicar la variación de nuestra variable respuesta (presencia/ausencia). Para minimizar los problemas potenciales de la construcción gradual del modelo, se ingresaron las variables predictivas una a la vez en un orden establecido de manera

arbitraria, basado en la experiencia y conocimiento previo que se tiene sobre el sistema de estudio (Whittingham *et al.*, 2006) conservando solo aquellas variables que resultaron en una disminución del criterio de información de Akaike (AIC) en al menos dos unidades (Burnham y Anderson, 2002). El AIC es un valor que pondera el número de parámetros del modelo con la bondad de ajuste de un modelo (Akaike, 1974).

En primer lugar, se agregaron las variables ambientales, de las cuales se sabe que afectan la distribución de algunos peces pelágicos. Por ejemplo, se sabe que la TSM es un buen indicador de la presencia de algunos tiburones debido a que es una variable que limita su distribución y metabolismo (Brenes *et al.*, 2000; Jaime-Rivera, 2004). La Chl-a se ha utilizado como un indicador indirecto de la abundancia de alimento disponible para las grandes especies pelágicas (Sartimbul *et al.*, 2010). Por otro lado, el ONI se ha utilizado para identificar las fases cálidas (Niño) y las fases frías (Niña) en el OPO; el ONI se calcula mediante el promedio móvil con una ventana de tres meses de la serie de tiempo de las anomalías de la TSM que se presentan en la región Niño 3.4 (5°N – 5°S, 120° – 170°O). Los eventos son definidos como Niño cuando la temperatura está por lo menos 0.5°C por encima de la temperatura promedio durante tres meses seguidos y Niña cuando la temperatura se encuentra 0.5°C por debajo.

Se dividió el set de datos de manera aleatoria en dos subconjuntos: el conjunto de datos denominado “entrenamiento”, el cual contiene el 75% de las observaciones totales y el segundo conjunto de datos para la “validación” con el 25%. El primer conjunto se utilizó para la construcción del modelo mientras que el segundo se utilizó para evaluar el rendimiento del modelo mediante la técnica del área bajo la curva (AUC por su acrónimo en inglés), misma que representa la probabilidad de predecir una presencia o ausencia correctamente y que estas no se den por condiciones aleatorias. La técnica de división aleatoria se ha utilizado de manera satisfactoria en estudios que modelan la presencia/ausencia de peces pelágicos mayores (Martínez-Rincón *et al.*, 2012; Farrell *et al.*, 2014, Marín-Enríquez *et al.*, 2018).

Para conocer el efecto que cada variable predictiva tiene sobre la presencia de las distintas especies de tiburones, se presentan las figuras de efectos parciales (Friedman, 2002).

VII.9. Predicciones y detección de hotspots

Una vez completado el proceso de validación para el modelo de cada especie, se realizaron las predicciones de la probabilidad de ocurrencia fuera del conjunto de datos “entrenamiento” utilizado anteriormente para la construcción del modelo. Para esto, se utilizó una base de datos ambientales que cubre toda el área de operación de la flota atunera internacional, con la finalidad de predecir la presencia potencial de las especies de tiburones, incluso en cuadrantes en donde no se presentó esfuerzo pesquero. Para esto se utilizó el número de lances promedio (548) realizados por la flota atunera sobre objetos flotantes durante 2003-2015. Después se promediaron las probabilidades de manera trimestral, y los mapas se representaron con gráficos de nivel (Cleveland, 1993; Marín-Enríquez *et al.*, 2018).

Para evaluar los cambios temporales por trimestre de las zonas con alta probabilidad de ocurrencia de los tiburones pelágicos estudiados se utilizó la parte superior del 95% del cuantil de las predicciones como una aproximación de hotspots (Goodyear, 2003). Finalmente, se representó en un mapa las áreas totales consideradas como hotspots con el fin de identificar un posible traslape en las preferencias de hábitat de las especies más representativas de la captura incidental de tiburones reportada por la flota internacional que pesca atunes con red de cerco.

VIII. RESULTADOS

VIII.1. Descripción espacial y temporal del esfuerzo de pesca

La flota internacional enfocada a la pesca de atún a través de los países incorporados a la CIAT realizó un total de 129,687 lances sobre objetos flotantes en el OPO durante el periodo 1993-2015. El promedio anual de lances presentó fluctuaciones a lo largo del periodo de estudio (Fig. 2). Sin embargo se puede observar que el ajuste del modelo presentó una tendencia promedio anual positiva ($a = 2,370$, $P < 0.01$; $b = 272$, $P < 0.01$) con una media de 5,638 lances por año. Durante 1993 se realizó el menor número de lances (955), mientras que 2015 fue el año con el mayor esfuerzo pesquero (9527).

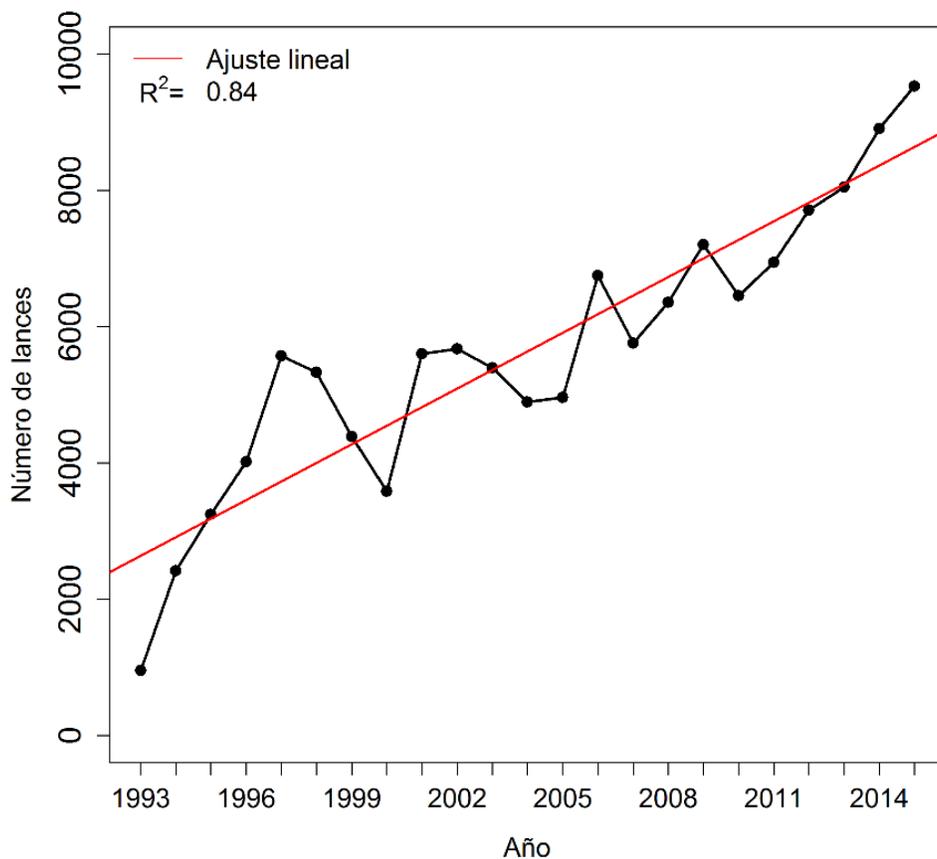


Figura 2. Tendencia promedio anual de lances realizados sobre el indicador de pesca objetos flotantes por la flota atunera internacional en el OPO durante 1993-2015.

En la figura 3 se muestra la distribución espacial del esfuerzo pesquero por trimestre. El patrón general del esfuerzo pesquero sobre objetos flotantes presentó una distribución al sur del ecuador durante los primeros dos trimestres (Figs 3 A y 3 B) y ligeramente al norte durante la segunda mitad del año (Figs. 3 C y 3 D).

Durante el primer trimestre (Fig. 3 A) el mayor número de lances se realizó desde las costas de Perú hasta los 90°O y entre los 5° y 20°S aproximadamente. En el segundo trimestre (Fig. 3 B), el área de mayores ocurrencias de lances sobre objetos flotantes aumentó considerablemente hacia el oeste, sobre los 5°N y 5°S y se observó un aumento en las costas de Panamá, Colombia y Ecuador. Finalmente, durante el tercer y cuarto trimestre (Figs. 3 C y 3 D) la distribución espacial de los lances fue muy similar, las zonas con mayor número de lances durante esta época se encontraron a lo largo de una franja que va de este a oeste entre los 5°N y 5°S, desde las costas de Ecuador y Colombia hasta los 120°O aproximadamente.

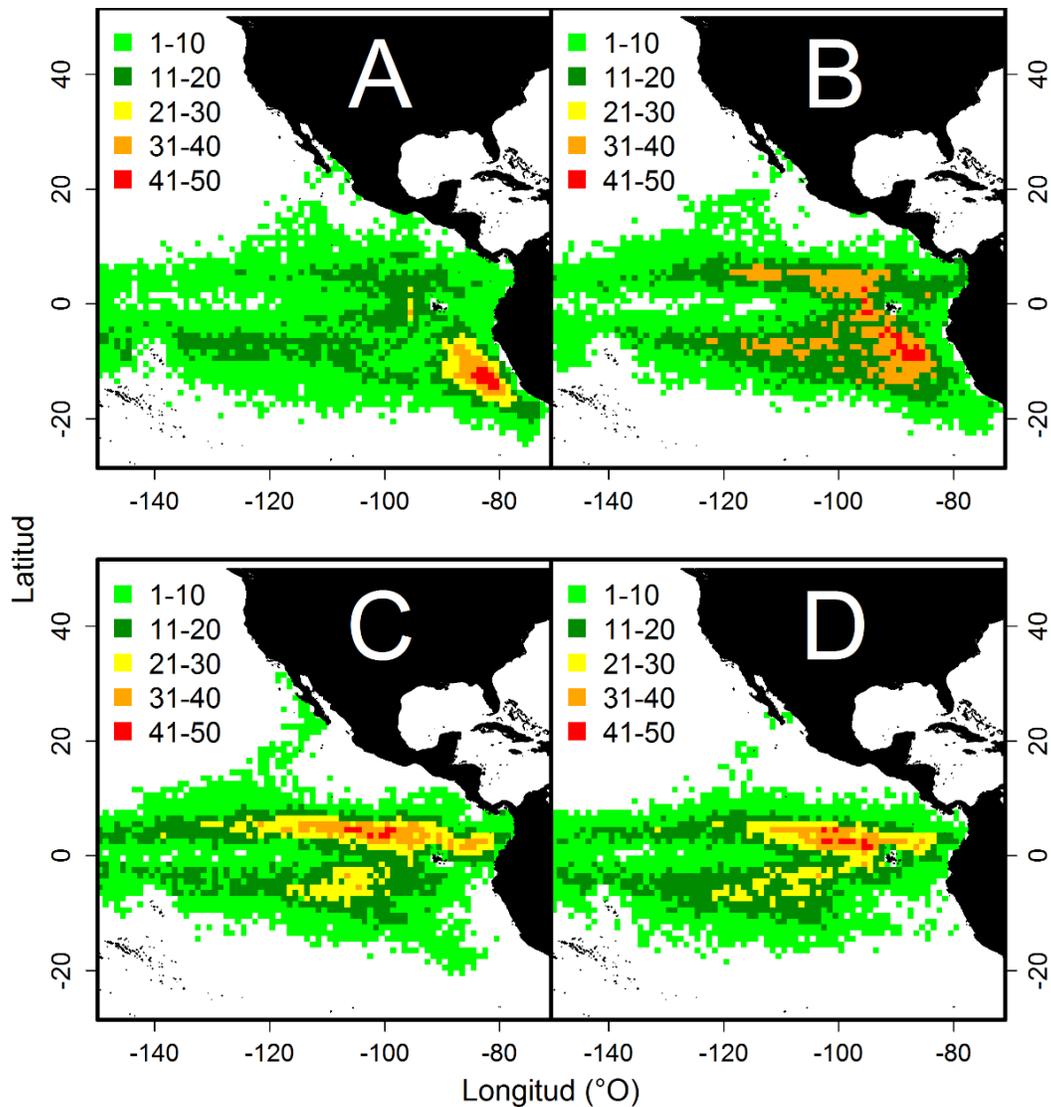


Figura 3. Distribución espacial de los lanzes realizados sobre el indicador de pesca objetos flotantes por la flota atunera internacional en el OPO durante 1993-2015. A) Trimestre I, B) Trimestre II, C) Trimestre III, D) Trimestre IV.

VIII.2. Descripción de la captura incidental de tiburones

El tiburón piloto fue la especie más capturada incidentalmente por la flota atunera internacional, reportándose un total de 337,035 individuos, lo cual representó el 78% de las capturas, seguido de 39,586 tiburones no identificados (9.2 %). El tiburón puntas blancas oceánico fue la segunda especie en importancia, y representó el

7.1% de las capturas con 30,617 individuos, seguido de la cornuda prieta (*S. zygaena*) con 7,525 tiburones que representaron el 1.7%. El grupo que incluye especies no identificadas del género *Sphyrna* y la cornuda común –*S. lewini*– representaron el 1.5 % cada uno con 6,489 y 6,450 individuos respectivamente, seguido del tiburón puntas negras (*Carcharhinus limbatus*) con el 0.24 % y un total de 1,023 individuos capturados. Por último, las especies no identificadas de tiburones zorro del género *Alopias*, ocuparon el 0.21 % de la captura total con 917 tiburones (Fig. 4). Las especies que se utilizaron en los análisis posteriores fueron el tiburón piloto, el tiburón puntas blancas oceánico, la cornuda prieta y la cornuda común, esto debido a importancia ecológica y comercial que presentan a nivel internacional.

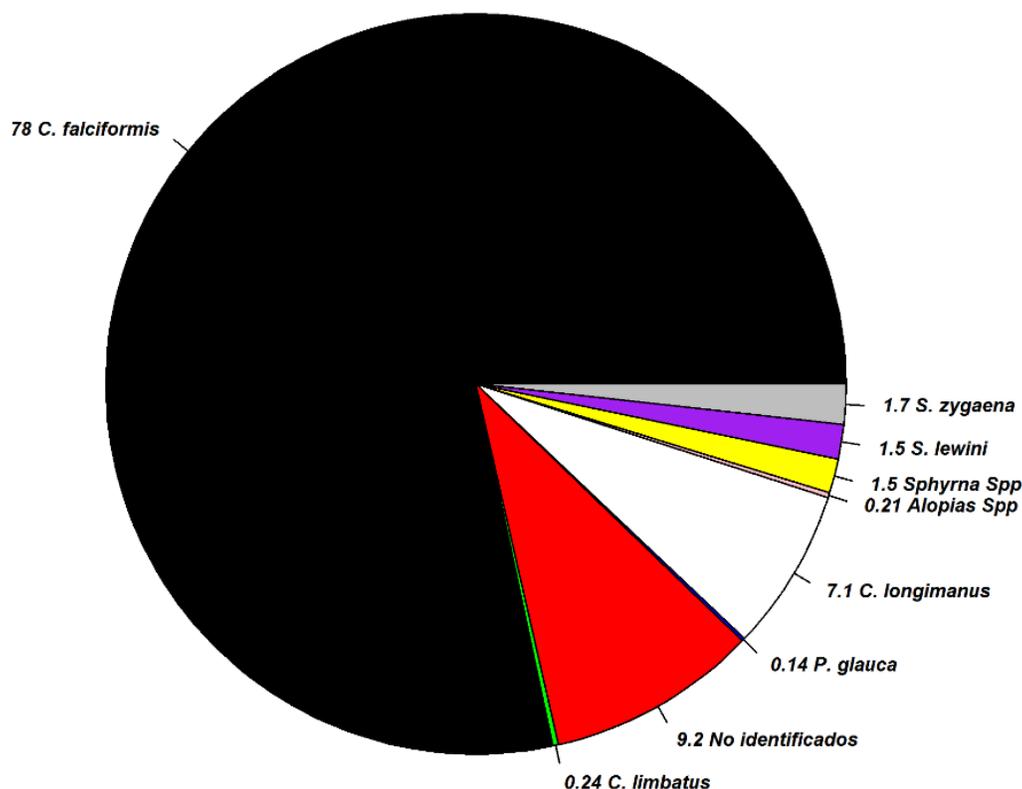


Figura 4. Composición porcentual del número de tiburones capturados incidentalmente por la flota atunera internacional en el OPO durante 1993-2015.

VIII.3. Tendencia de la captura incidental por unidad de esfuerzo

La CIPUE de las especies más importantes de la captura incidental presentó variaciones durante el periodo 1993-2015 (Fig. 5). Se observa que para *C. falciformis* los valores más bajos se presentaron durante el primer año de estudio, mientras que el valor máximo se presentó durante el 2015. En el caso de *C. longimanus* el valor máximo se presentó durante 1997 y el mínimo en el año 2012. *S. lewini* y *S. zygaena* presentaron los valores mínimos en 1994 y 1993 respectivamente, mientras que los valores máximos se presentaron en 2003 para ambas especies. El ajuste lineal de la CIPUE de *C. falciformis* presentó una tendencia al aumento de 47.8% anual igual que *S. lewini* y *S. zygaena* en un 4.90% y 10.51% anual respectivamente. Por otro lado, la CIPUE del tiburón *C. longimanus* presentó una tendencia en declive del 5.33% anual (tabla I).

Tabla I. Resumen del ajuste lineal de la CIPUE de las especies más representativas de la captura incidental de tiburones.

Especie	a	P	b	P
<i>C. falciformis</i>	119.67	0.0827	4.77	< 0.01
<i>C. longimanus</i>	160.60	< 0.01	-0.71	< 0.01
<i>S. lewini</i>	5.33	< 0.01	0.02	< 0.05
<i>S. zygaena</i>	4.22	< 0.05	0.03	< 0.01

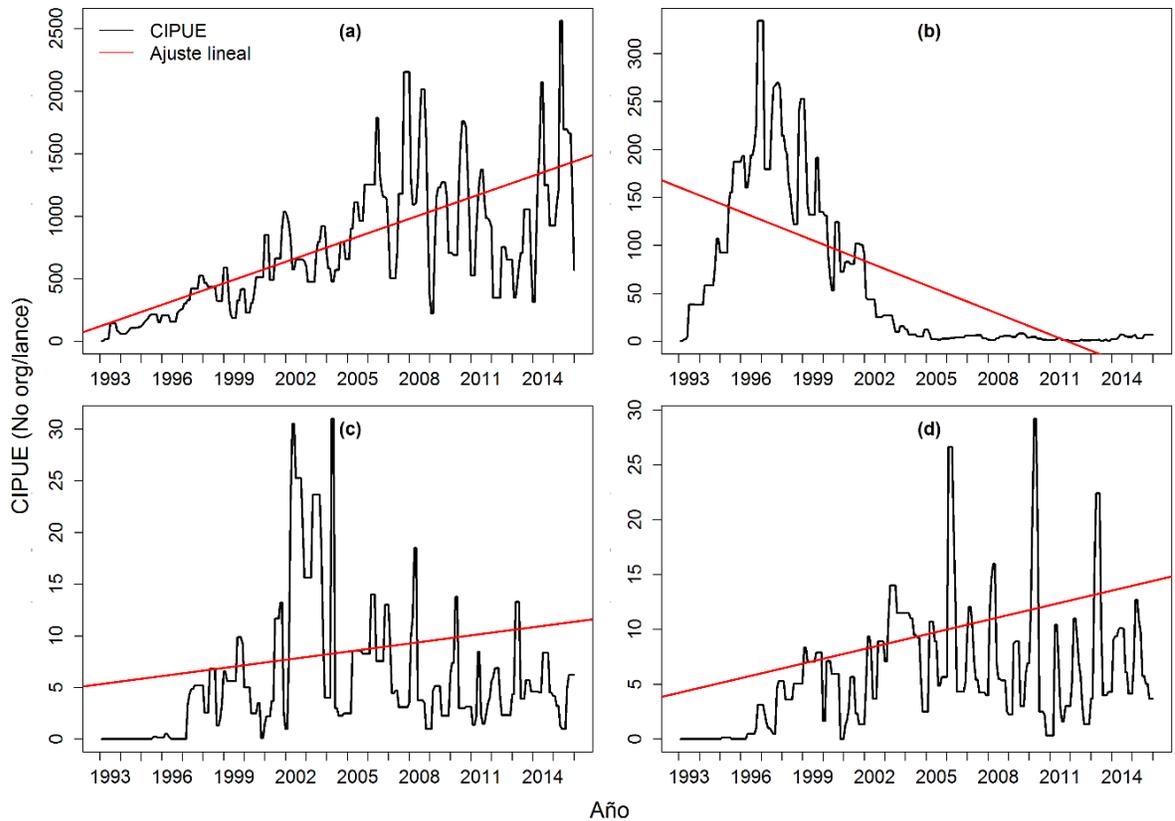


Figura 5. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (núm. organismos/núm. lances) de tiburones en el OPO durante 1993-2015. (a) *Carcharhinus falciformis*, (b) *Carcharhinus longimanus*, (c) *Sphyrna lewini*, (d) *Sphyrna zygaena*.

VIII.4. Descripción espacial y temporal de la CIPUE

VIII.4.1. *Carcharhinus falciformis*

En la figura 6 se observa que la CIPUE de *C. falciformis* se encontró ampliamente distribuida en el área de estudio durante los cuatro trimestres, tanto en zonas oceánicas como costeras. A pesar de presentar una distribución amplia, la mayor concentración de la CIPUE de esta especie se registró en zonas oceánicas sobre los 10°N principalmente entre los 120° y 140°O durante el segundo y tercer trimestre (Figs. 6 B y 6 C). La CIPUE se incrementó en la costa occidental de la Península de Baja California durante el segundo trimestre (Fig. 6 B) y con mayor intensidad en el tercero (Fig. 6 C).

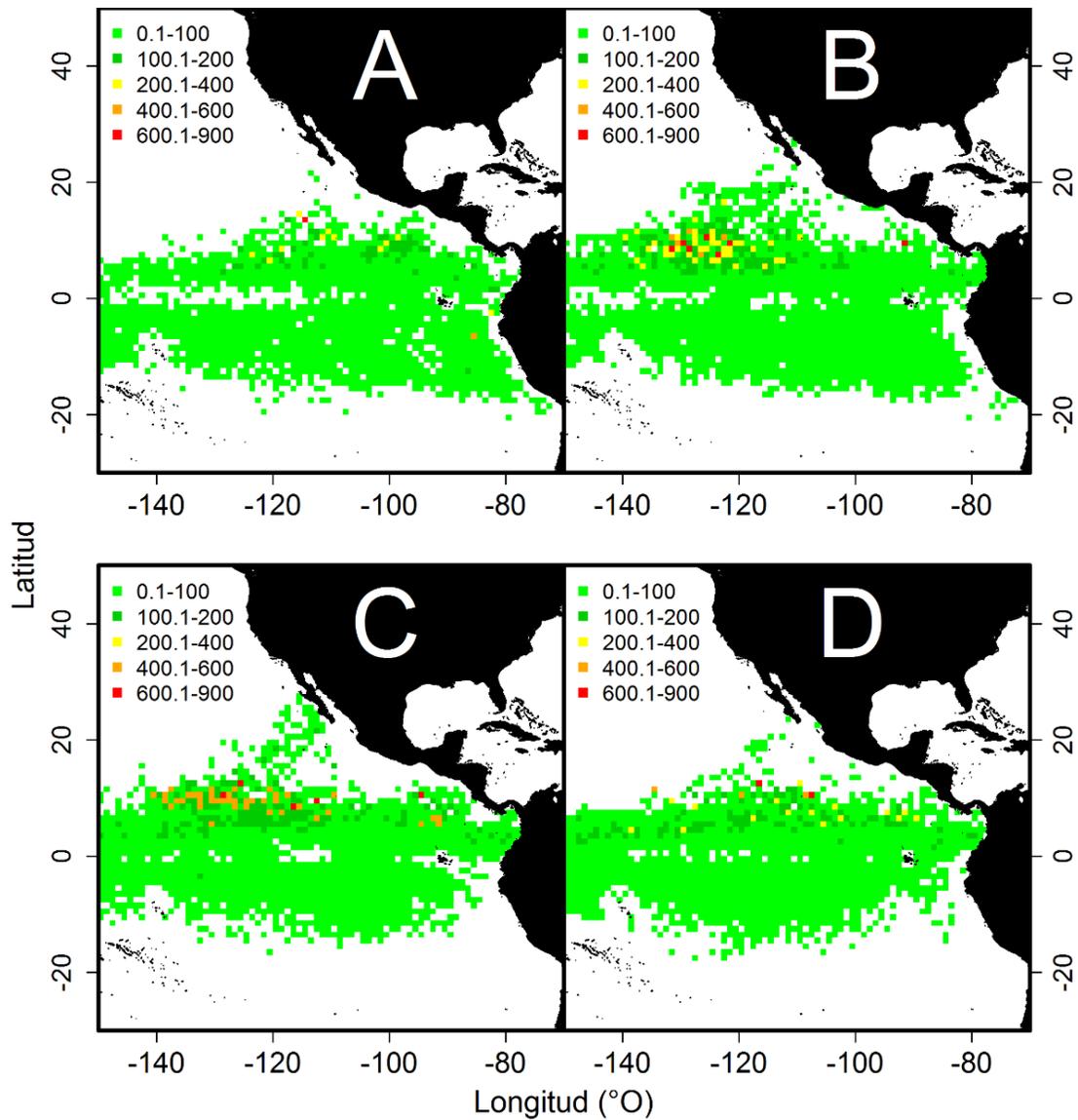


Figura 6. Distribución espacial de la CIPUE (núm. organismos/núm. lances) de *Carcharhinus falciformis* en el OPO durante 1993-2015. A) Trimestre I, B) Trimestre II, C) Trimestre III, D) Trimestre IV.

VIII.4.2. *Carcharhinus longimanus*

La CIPUE de *C. longimanus* presentó una distribución más reducida en comparación con *C. falciformis*, ubicada principalmente en zonas alejadas de la costa. Los valores más altos para la especie se presentaron durante el tercer y cuarto trimestre del año (Figs. 7 C y 7 D), entre la franja de los 10°N y la franja de los 10°S y entre los 100° –

130°O. Se observaron algunos cuadrantes con una concentración de capturas notoria en la costa occidental de la península de Baja California y en el golfo de Panamá durante el segundo y tercer trimestre respectivamente (Figs. 7 B y 7 C).

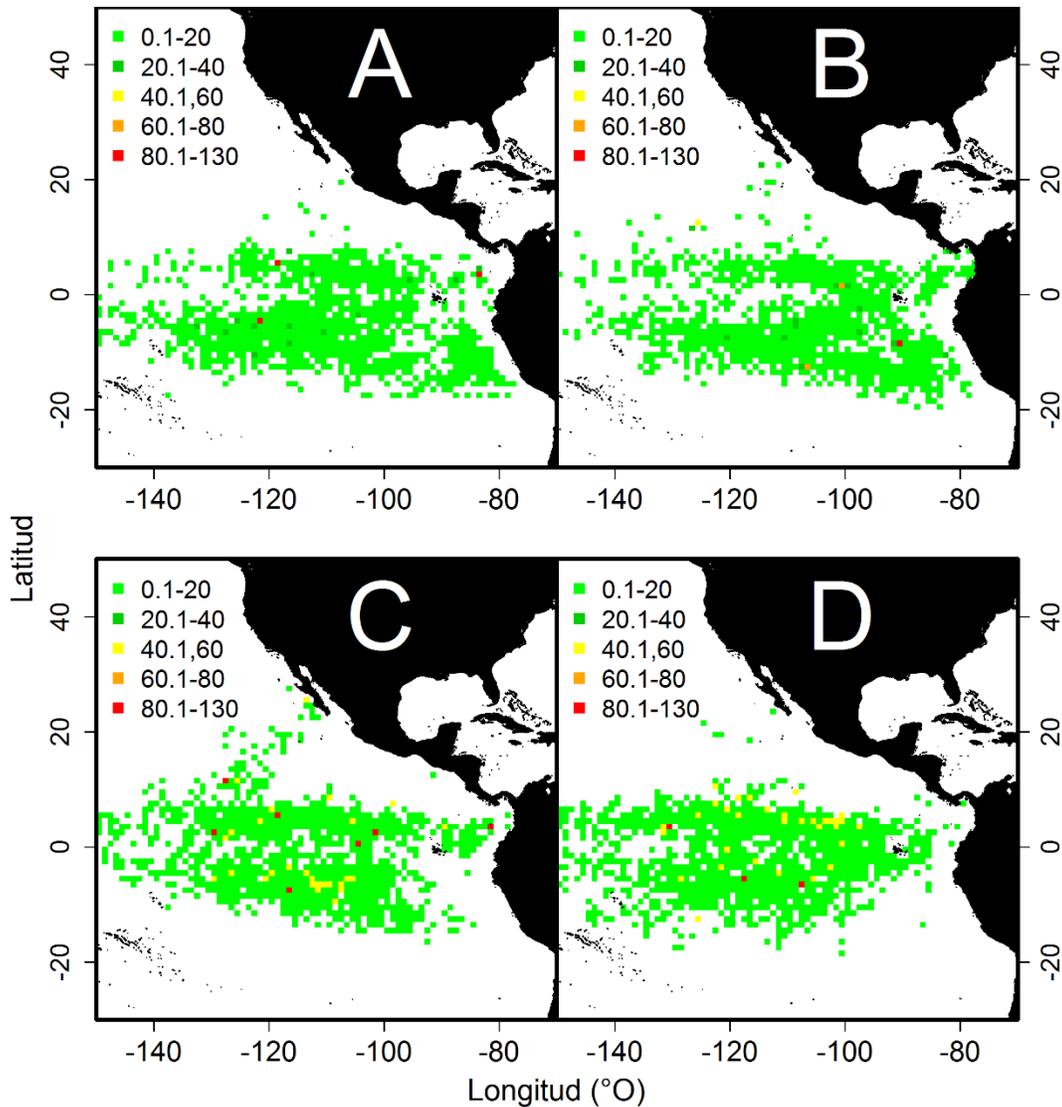


Figura 7. Distribución espacial de la CIPUE (número de organismos/número de lances) de *Carcharhinus longimanus* en el OPO durante 1993-2015. A) Trimestre I, B) Trimestre II, C) Trimestre III, D) Trimestre IV.

VIII.4.3. *Sphyrna lewini*

En la figura 8 se observa la CIPUE de *S. lewini* registrada durante 1993-2015, la cual presentó una distribución reducida en comparación al área de operación de la flota

atunera internacional. Los valores más elevados de la CIPUE de esta especie se presentaron durante el primer y segundo trimestre, principalmente en zonas relativamente cercanas a las costas de Perú (Figs. 8 A y 8 B). Durante el tercer y cuarto trimestre se observó un desplazamiento general de las capturas hacia el noroeste, con zonas importantes de captura en la costa occidental de la Península de Baja California y al norte de las islas Galápagos (Figs. 8 C y 8 D).

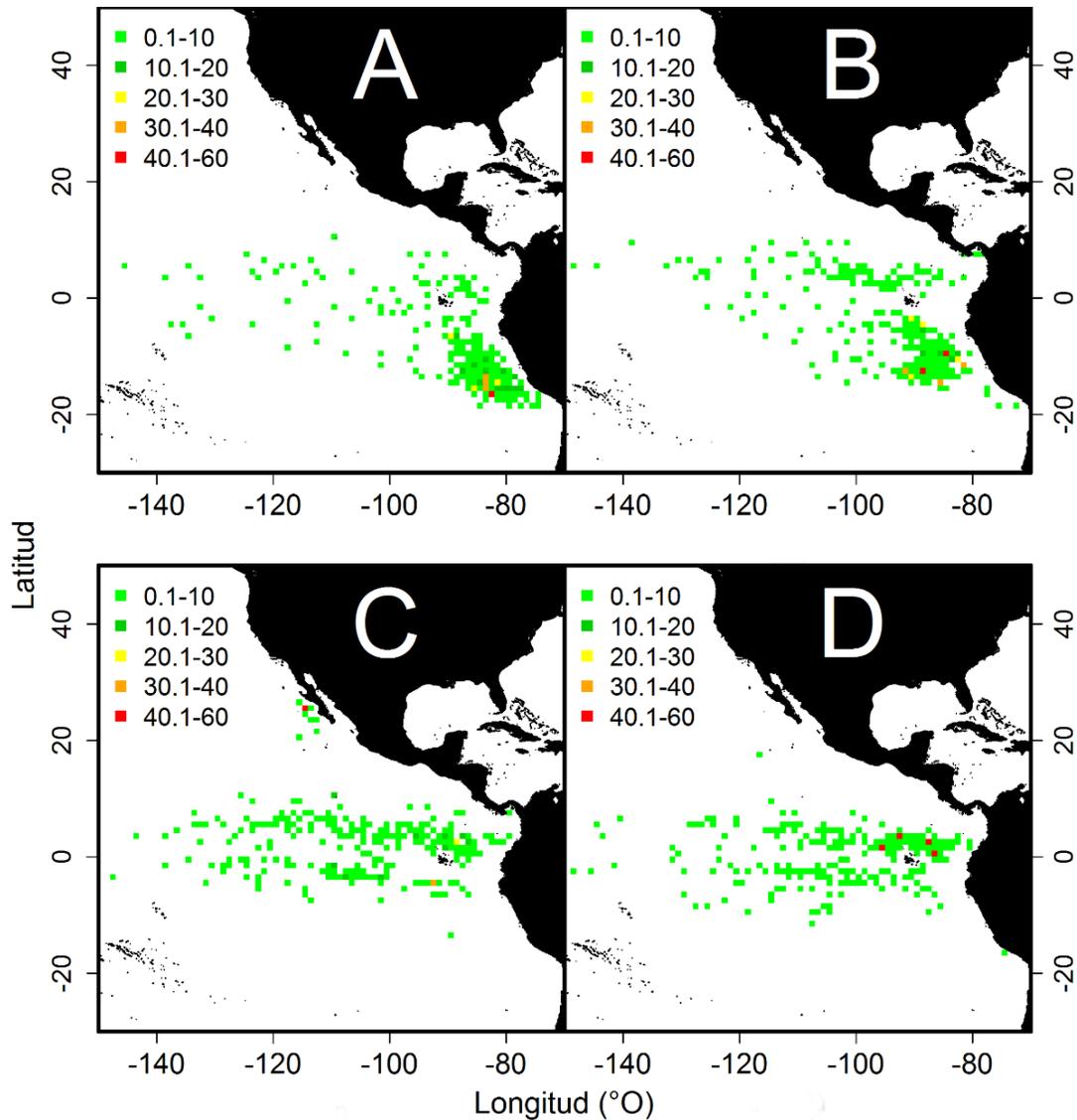


Figura 8. Distribución espacial de la CIPUE (núm. organismos/núm. lances) de *Sphyrna lewini* en el OPO durante 1993-2015. A) Trimestre I, B) Trimestre II, C) Trimestre III, D) Trimestre IV.

VIII.4.4. *Sphyrna zygaena*

En la figura 9 se observa que el patrón de la distribución espacial de la CIPUE de *S. zygaena* es muy similar al de *S. lewini*. De igual manera se observa durante los primeros dos trimestres los mayores valores de la CIPUE en zonas relativamente cercanas a las costas de Perú (Figs 9 A y 9 B). En los siguientes dos trimestres se observa como la CIPUE se desplaza hacia el noroeste con una zona de capturas en la costa occidental de la Península de Baja California durante el tercer trimestre (Figs. 9 C y 9 D).

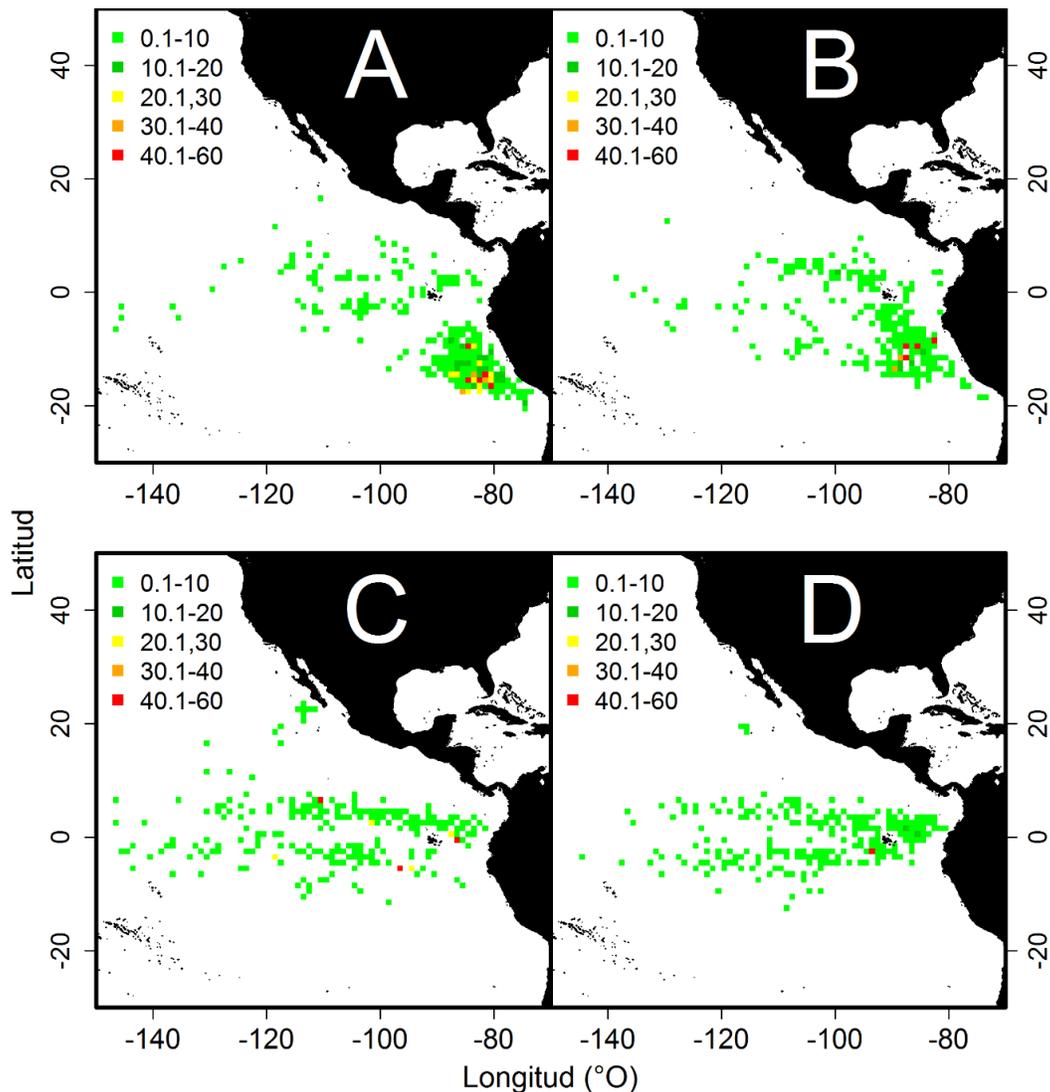


Figura 9. Distribución espacial de la CIPUE (núm. organismos/núm. lances) de *Sphyrna zygaena* en el OPO durante 1993-2015. A) Trimestre I, B) Trimestre II, C) Trimestre III, D) Trimestre IV.

VIII.5. Caracterización ambiental del área de estudio

VIII.5.1. Temperatura superficial del mar

La TSM en el OPO presentó variaciones espaciales y temporales muy marcadas a lo largo del año, con un intervalo que va desde los 18°C hasta los 32°C. La temperatura más baja registrada en el área de operación de la flota atunera internacional (18°C) se ubicó al oeste de la península de Baja California y en las costas de Perú, durante el segundo y tercer trimestre respectivamente (Figs 10 B y 10 C). Por otro lado, la TSM más alta registrada (32°C) se presentó desde el golfo de California y el Pacífico mexicano hasta el golfo de Panamá. Dichas temperaturas delimitan un área a la cual se le conoce como alberca de agua cálida. A partir del segundo y tercer trimestre (Figs. 10 B y 10 C) se observó la alberca de agua cálida completamente desarrollada, mientras que a partir del cuarto trimestre (Fig. 10 D), se detectaron algunos filamentos de agua más fría en el golfo de Tehuantepec, el golfo de Papagayos y en el golfo de Panamá desde la costa hacia mar adentro, rompiendo la estructura de la alberca de agua cálida. Por otro lado, se detectó el domo de Costa Rica, el cual es un área que presenta una TSM menor en comparación a las zonas de latitudes similares y se localizó frente a Nicaragua y Costa Rica. Esta zona presentó variaciones espaciales a lo largo del año.

Es claramente visible una lengua de agua relativamente fría, exactamente sobre el ecuador. Esta lengua proviene del suroeste y presentó una mayor intensidad durante la segunda mitad del año.

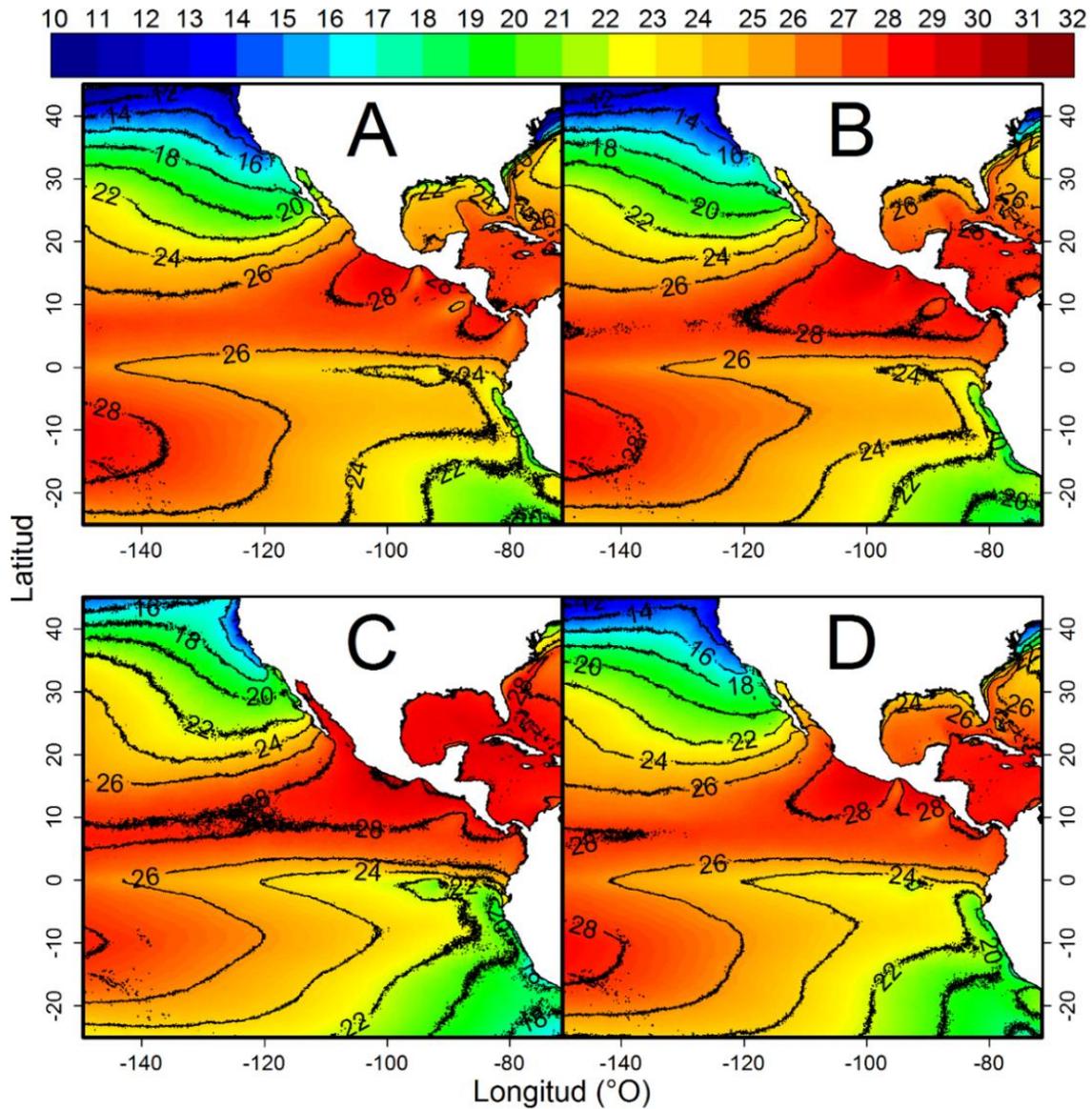


Figura 10. Variación de la TSM (°C) en el OPO durante 2003-2015. A) Trimestre I, B) Trimestre II, C) Trimestre III, D) Trimestre IV.

VIII.5.2. Concentración de clorofila-a

Al igual que la TSM, la Chl-a presentó variaciones espaciales y temporales en el área de estudio. Se observó que los valores mayores de Chl-a ($8.33 - 14.11 \text{ mg m}^{-3}$) se presentaron en la costa occidental de la península de Baja California durante el primer semestre del año (Figs. 11 A y 11 B), dentro del golfo de California con una

inversión espacial y temporal. Durante el primer semestre (Fig. 11 A) la mayor cantidad de Chl-a se presentó en la costa este y durante el tercer trimestre (Fig. 11 C) en la costa oeste del golfo de California.

Por último, otra de las zonas con mayor importancia con respecto a los niveles de Chl-a, se presentó durante el tercer trimestre (Fig. 11C) en la parte sur del área de operación de la flota atunera internacional, en las costas de Perú.

Por otro lado, se observaron zonas importantes en el golfo de Tehuantepec, golfo de Papagayos y en el golfo de Panamá. Estas zonas fueron importantes durante todo el año, sin embargo presentaron una mayor cantidad de pigmentos fotosintéticos durante el primer trimestre del año (Fig. 11 A).

La zona de surgencias ecuatoriales fue claramente visible durante todo el año, con una mayor influencia durante el segundo semestre, desde la zona costera a la altura del ecuador hasta los 150°O (11 C y 11 D).

Se logró detectar también algunas zonas oligotróficas en el área de estudio, localizadas entre los 110° – 150°O y 10° – 30°N y entre los 80° – 150°O y 10° – 20°S, las cuales se mantuvieron presentes durante todo el año.

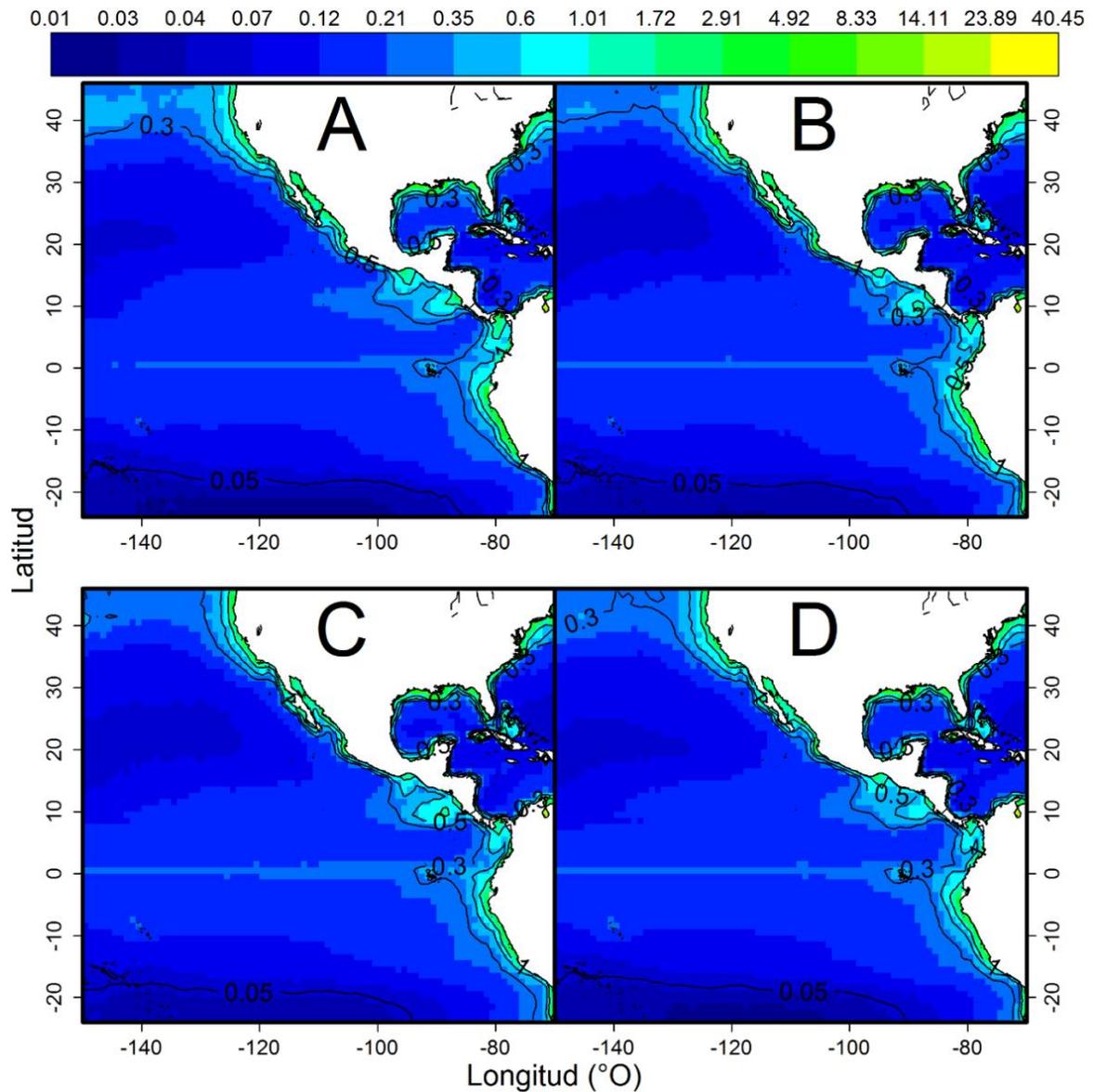


Figura 11. Variación de la Chl-a (mg m^{-3}) en el OPO durante 2003-2015. A) Trimestre I, B) Trimestre II, C) Trimestre III, D) Trimestre IV.

VIII.6. Relación entre la CIPUE y la TSM

VIII.6.1 *Carcharhinus falciformis*

Los resultados del análisis de correlación cruzada sugieren que las series de tiempo mensuales de la CIPUE de *C. falciformis* y la serie de la TSM presentaron una mejor

correlación de manera directa (0.270) con un desfase temporal negativo de 12 meses. La correlación encontrada en este caso fue estadísticamente significativa (figura 12). De igual manera se encontraron otras correlaciones significativas menores: una directa (0.200) con un desfase positivo de 12 meses y una indirecta (-0.220) con un desfase positivo de cinco meses.

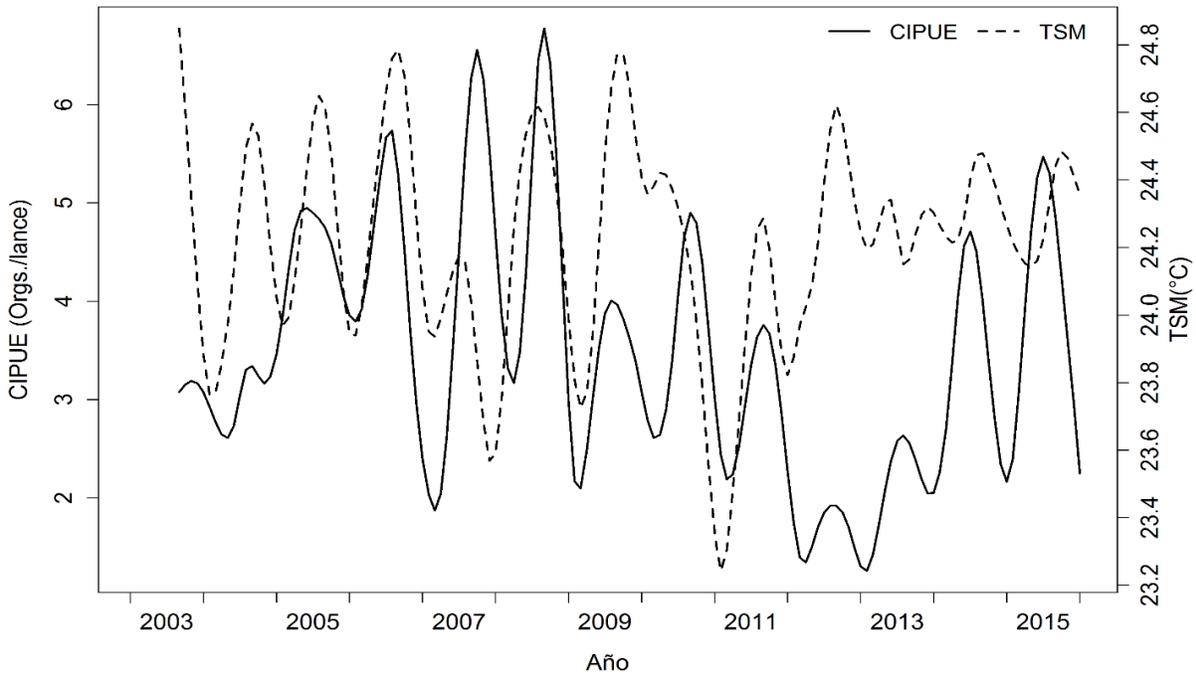


Figura 12. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (núm. organismos/núm. lances) de *Carcharhinus falciformis* y la TSM (°C) promedio mensual en el OPO durante 2003-2015.

VIII.6.2. *Carcharhinus longimanus*

En el caso de *C. longimanus* la correlación absoluta mayor fue negativa y significativa (-0.173) con un tiempo de desfase de 8 meses entre la TSM y la CIPUE de esta especie (figura 13).

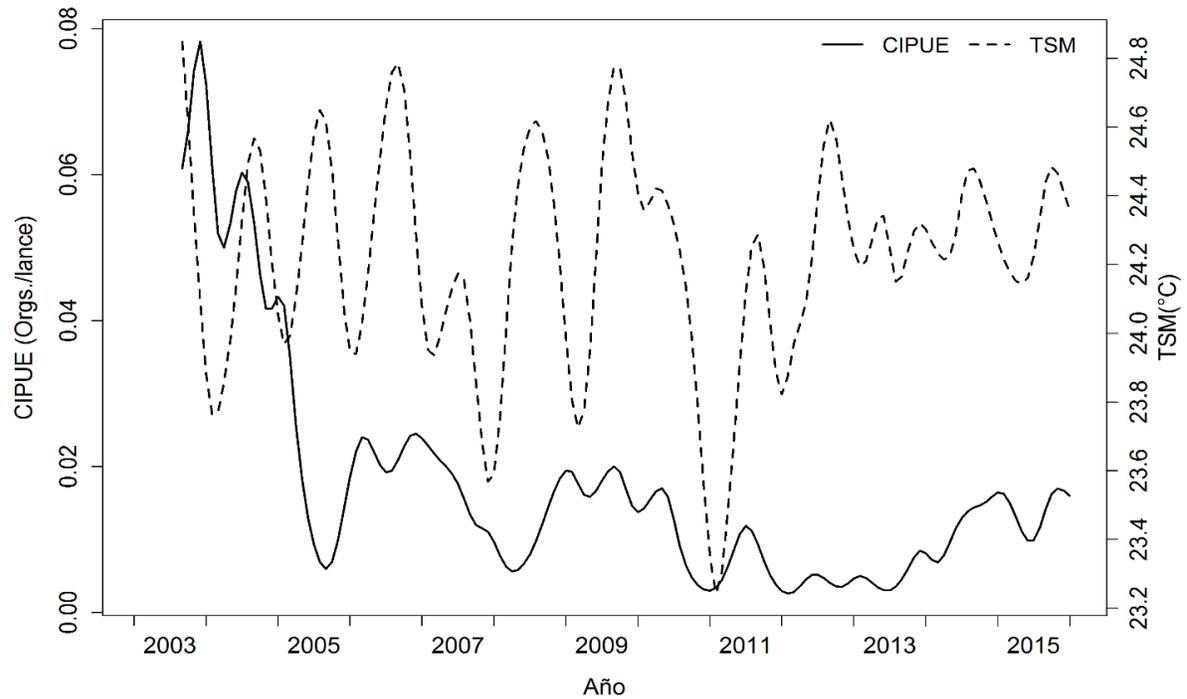


Figura 13. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (número de organismos/número de lances) de *Carcharhinus longimanus* y la TSM (°C) promedio mensual en el OPO durante 2003-2015.

VIII.6.3. *Sphyrna lewini*

En la figura 14 se muestra la relación entre las series de tiempo de la TSM y la CIPUE de *S. lewini*. Se obtuvo una correlación negativa (-0.253) y significativa, con un desfase negativo de dos meses.

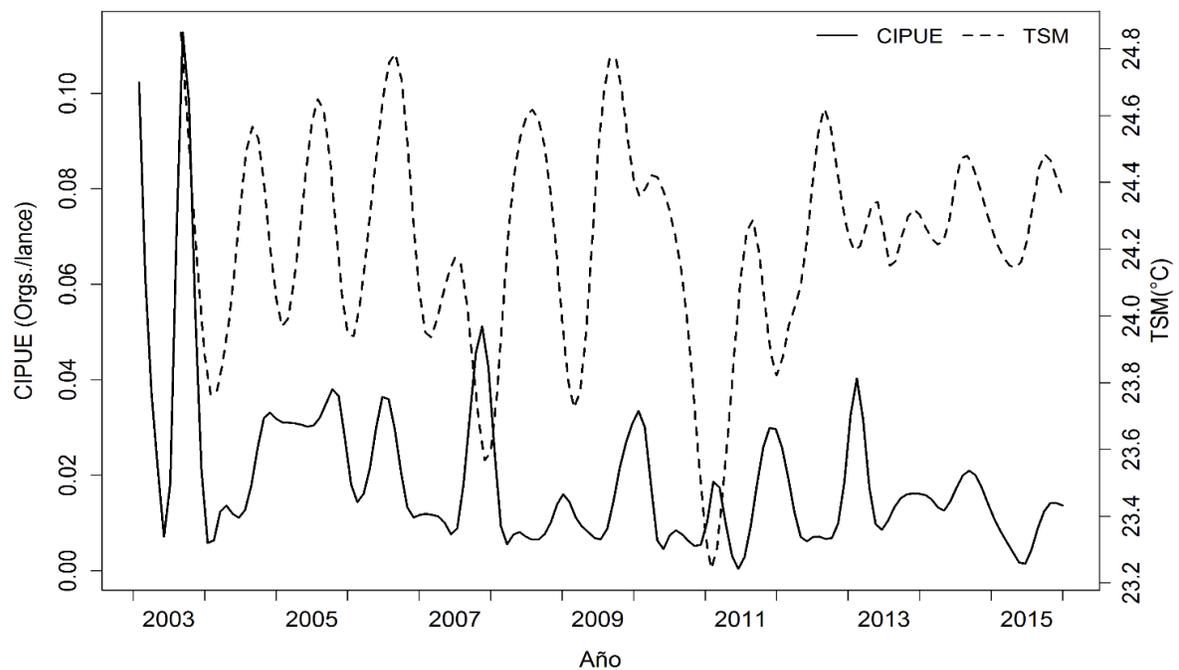


Figura 14. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (número de organismos/número de lances) de *Sphyrna lewini* y la TSM (°C) promedio mensual en el OPO durante 2003-2015.

VIII.6.4 *Sphyrna zygaena*

Para el caso de *S. zygaena* la máxima correlación que se obtuvo fue de -0.298, la cual fue significativa y se presentó con un desfase negativo de dos meses (figura 15).

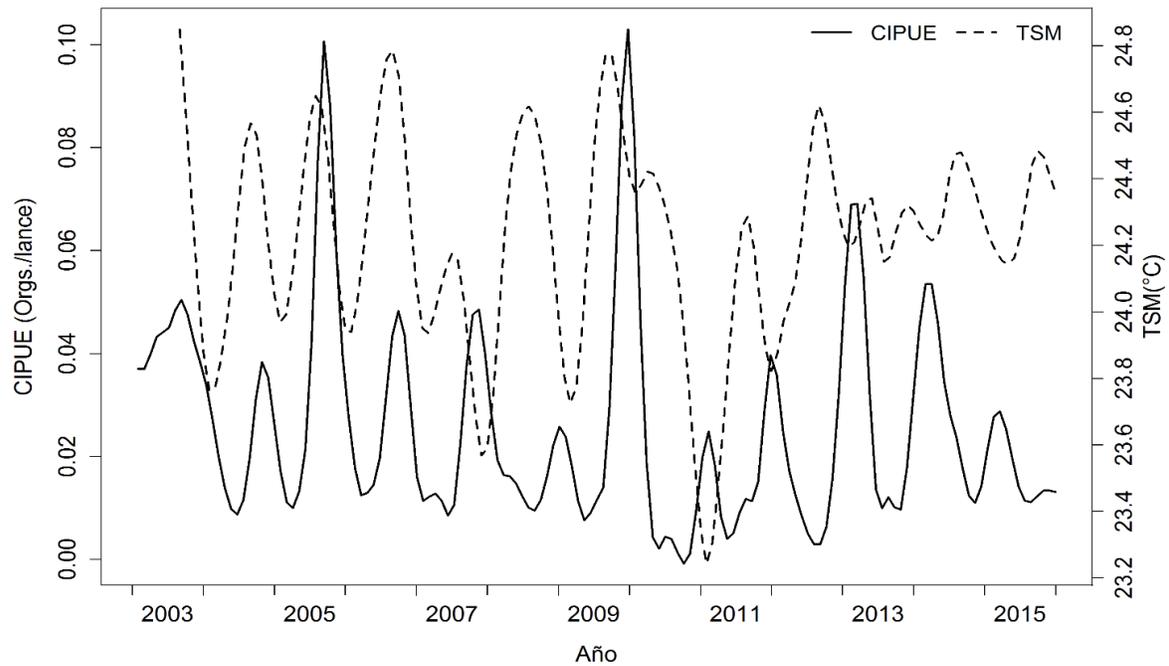


Figura 15. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (núm. organismos/núm. lances) de *Sphyrna zygaena* y la TSM (°C) promedio mensual en el OPO durante 2003-2015.

VIII.7. Relación entre la CIPUE y la Chl-a

VIII.7.1. *Carcharhinus falciformis*

El análisis de correlación cruzada mostró una correlación positiva y significativa (0.271) entre las series de tiempo de la Chl-a y la CIPUE de *C. falciformis* con un desfase de 7 meses (figura 16).

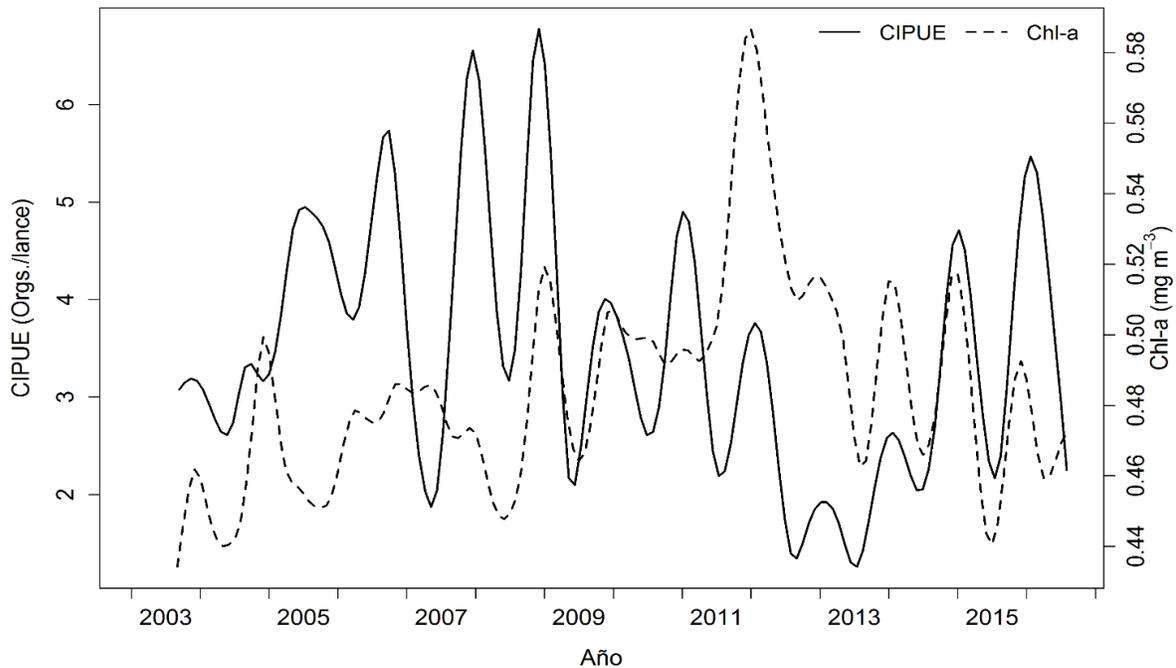


Figura 16. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (número de organismos/número de lances) de *Carcharhinus falciformis* y la Chl-a (mg m⁻³) promedio mensual en el OPO durante 2003-2015.

VIII.7.2. *Carcharhinus longimanus*

Se encontró una correlación significativa negativa (-0.312) con un desfase negativo de 11 meses entre la serie de tiempo de la Chl-a y la serie de tiempo de la CIPUE del tiburón *C. longimanus* (figura 17).

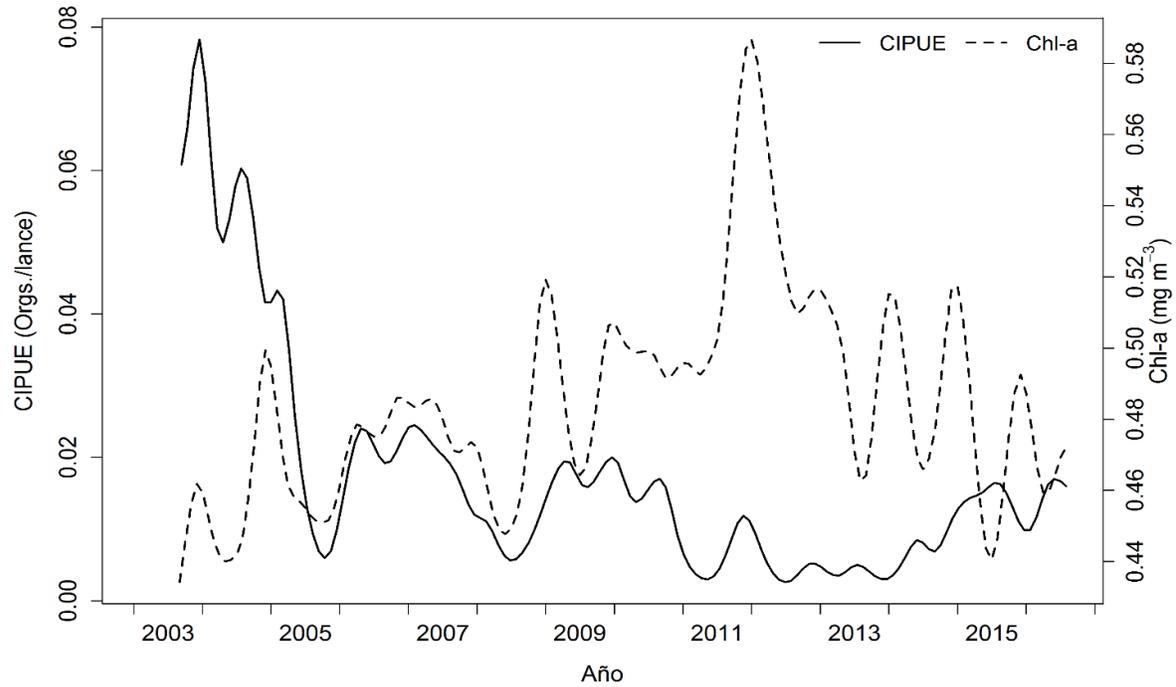


Figura 17. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (núm. organismos/núm. lances) de *Carcharhinus longimanus* y la Chl-a (mg m^{-3}) promedio mensual en el OPO durante 2003-2015.

VIII.7.3. *Sphyrna lewini*

Para el caso de *S. lewini*, el análisis de correlación cruzada arrojó una correlación positiva y significativa (0.386) con un desfase negativo de 11 meses entre las series de tiempo de la CIPUE de la especie y la Chl-a (figura 18).

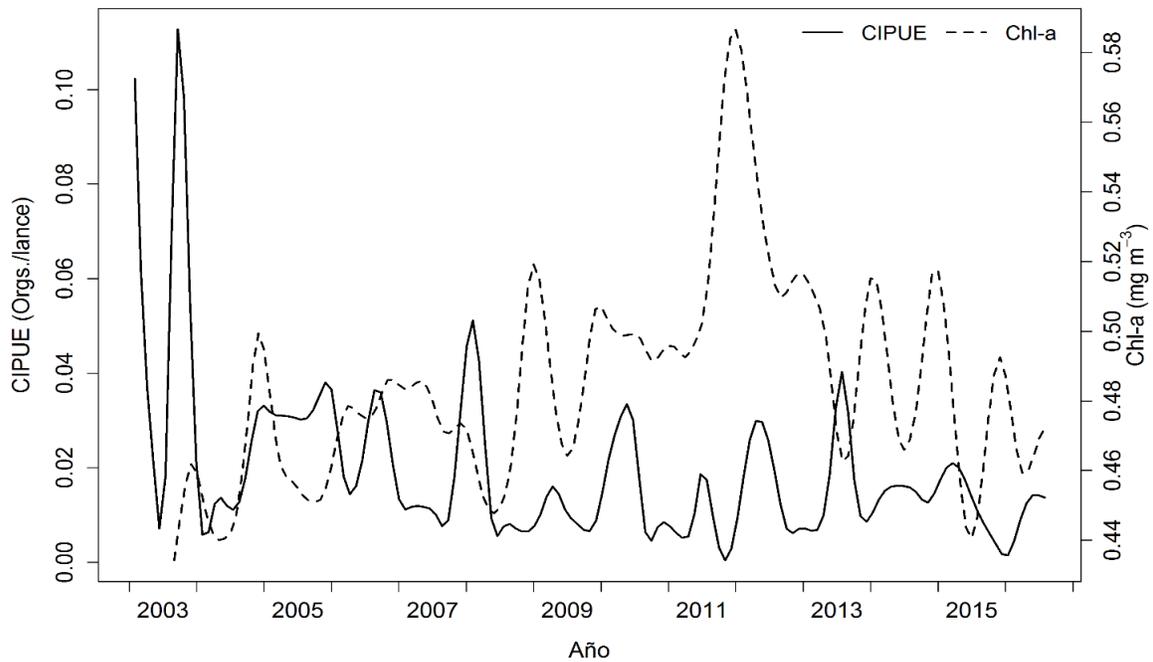


Figura 18. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (número de organismos/número de lances) de *Sphyrna lewini* y la Chl-a (mg m^{-3}) promedio mensual en el OPO durante 2003-2015.

VIII.7.4. *Sphyrna zygaena*

Se encontró un valor de correlación positivo y significativo (0.242) con un desfase positivo de 1 mes entre la serie de tiempo de la Chl-a y la serie de tiempo de la CIPUE de *S. zygaena* (figura 19).

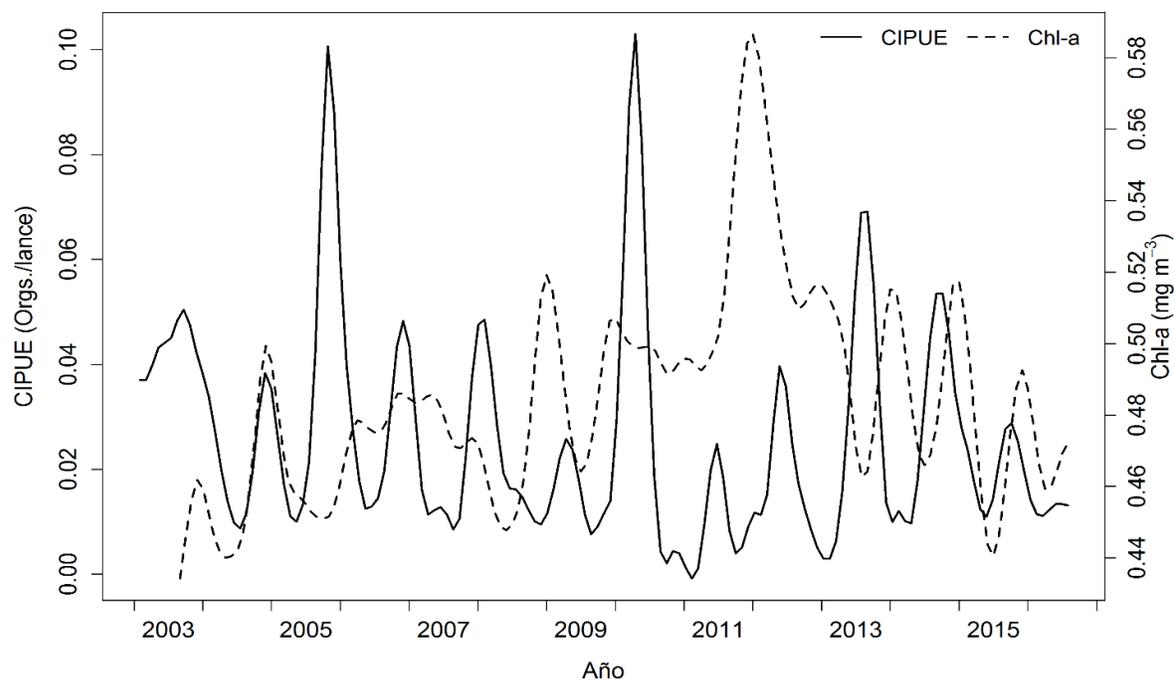


Figura 19. Series de tiempo suavizadas de la CIPUE (núm. organismos/núm. lances) de *Sphyrna zygaena* y la Chl-a (mg m^{-3}) promedio mensual en el OPO durante 2003-2015.

VIII.8 Modelación de la ocurrencia de las especies de tiburones más representativas de la captura incidental

VIII.8.1 *Carcharhinus falciformis*

El modelo de ocurrencia final de *C. falciformis* explicó el 19.1% de la devianza total. Las variables que tuvieron un aporte mayor a la explicación de la probabilidad de ocurrencia de la especie fueron la TSM con el 7.81% de la devianza explicada, el número de lances (3.18%) y la latitud (2.8%) (Tabla II).

Tabla II. Resumen de las variables explicativas utilizadas para modelar la ocurrencia de *C. falciformis* en el OPO durante 2003-2015. El orden de las variables es el que se siguió en la construcción del modelo.

	Devianza explicada total (%)	Devianza explicada parcial (%)	AIC	Δ AIC
Nulo			47508.13	
+s(TSM)	7.81	7.81	43811.43	3696.70
+s(log(Chl-a))	8.33	0.52	43568.01	243.42
+s(ONI)	8.92	0.59	43302.34	265.67
+s(#lances)	12.1	3.18	41825.29	1477.05
+s(Mes)	12.3	0.2	41722.63	102.66
+s(Año)	13.0	0.7	41415.74	306.89
+s(Longitud)	14.8	1.8	40552.64	863.10
+s(Latitud)	17.6	2.8	39249.50	1303.14
+s(Lon,Lat)	18.2	0.6	39021.87	227.63
+s(Lon, Año)	18.5	0.3	38900.17	121.70
+s(Lat, Año)	19.1	0.6	38701.70	198.47

El modelo final quedó de la siguiente manera:

$$\text{Logit} ([P/A \text{ } C. \text{ falciformis}]) = s(\text{TSM}) + s(\log(\text{Chl-a})) + s(\text{ONI}) + s(\text{\#lances}) + s(\text{Mes}) + s(\text{Año}) + s(\text{Longitud}) + s(\text{Latitud}) + s(\text{lon,lat}) + s(\text{lon,año}) + s(\text{lat,año}) + \varepsilon$$

El modelo tuvo una buena evaluación con un valor de AUC= 0.78%. Las figuras de efecto sugieren que la probabilidad de ocurrencia de *C. falciformis* es mayor en un intervalo de TSM de 25° y 27°C (Fig. 20 a), cuando la Chl-a presenta valores <1 mg m⁻³ (Fig. 20 b), durante eventos El Niño (Fig. 20 c). Por otro lado, la probabilidad de ocurrencia del tiburón piloto es mayor conforme aumenta el número de lances (Fig. 20 d), sin embargo la probabilidad disminuye a partir de los 25 lances. Por último, se observa que el tiburón piloto presenta preferencias por habitar en latitudes que van entre los 5°S y 5°N y longitudes entre los 110° y 120°O (Figs. 20 g y 20 h).

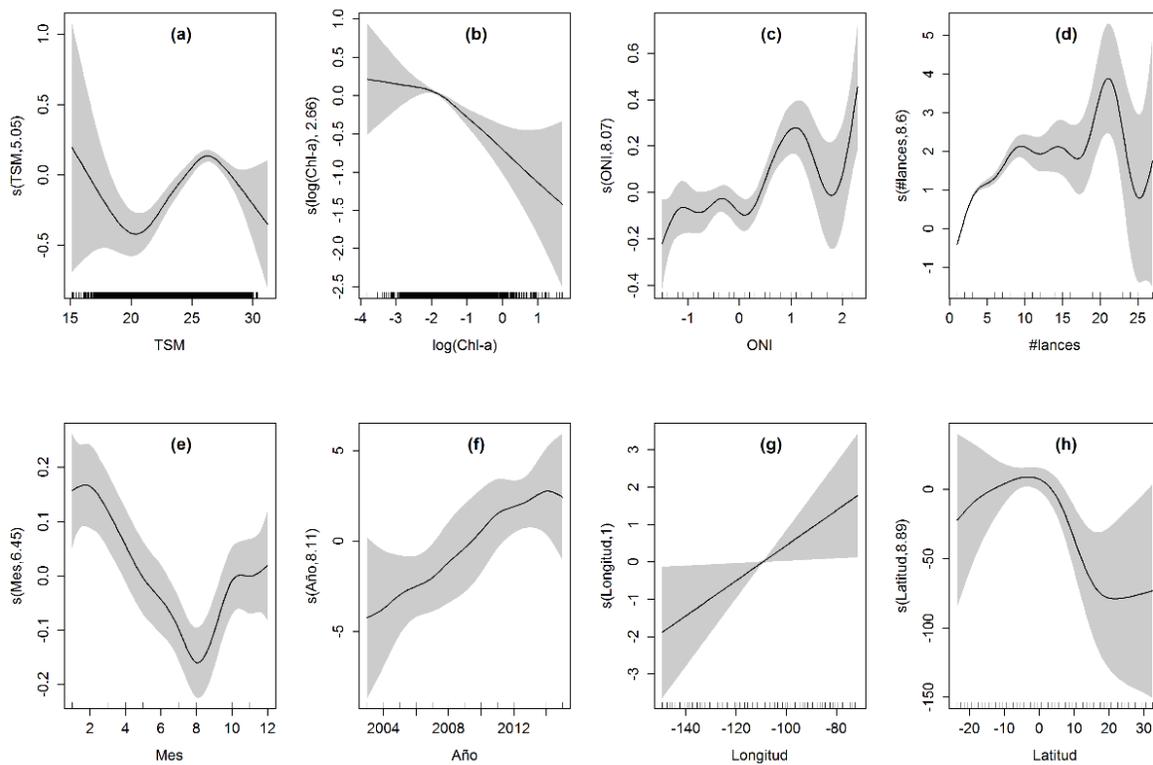


Figura 20. Figura de efectos parciales del modelo de ocurrencia de *Carcharhinus falciformis*.

VIII.8.2 *Carcharhinus longimanus*

En la tabla III se muestra el efecto que tienen las variables predictivas sobre la presencia del tiburón *C. longimanus*. El modelo de ocurrencia final explicó un total de 19.8% de la devianza total. Las variables que tuvieron un mayor aporte a la

explicación de la probabilidad de ocurrencia de la especie fueron la longitud con el 6.78 % de la devianza explicada, la TSM (2.23%) y el año (1.72%).

Tabla III. Resumen de las variables explicativas utilizadas para modelar la ocurrencia de *Carcharhinus longimanus* en el OPO durante 2003-2015. El orden de las variables es el que se siguió en la construcción del modelo.

	Devianza explicada total (%)	Devianza explicada parcial (%)	AIC	Δ AIC
Nulo			6070.372	
+s(TSM)	2.23	2.23	5941.635	128.73
+s(log(Chl-a))	2.98	0.75	5902.272	39.36
+s(ONI)	4.23	1.25	5835.883	66.38
+s(#lances)	5.48	1.25	5773.441	62.44
+s(Mes)	5.60	0.12	5769.216	4.22
+s(Año)	7.32	1.72	5674.538	94.67
+s(Longitud)	14.10	6.78	5270.664	403.87
+s(Latitud)	15.40	1.30	5207.186	63.47
+s(Lon,Lat)	16.70	1.30	5144.369	62.81
+s(Lon, Año)	18.1	1.40	5107.018	37.35
+s(Lat, Año)	19.8	1.70	5023.904	83.11

El modelo final quedó de la siguiente manera:

$$\text{Logit} ([P/A \text{ C. longimanus}]) = s(\text{TSM}) + s(\log(\text{Chl-a})) + s(\text{ONI}) + s(\#\text{lances}) + s(\text{Mes}) + s(\text{Año}) + s(\text{Longitud}) + s(\text{Latitud}) + s(\text{lon,lat}) + s(\text{lon,año}) + s(\text{lat,año}) + \varepsilon$$

La evaluación del modelo de ocurrencia de *C. longimanus* fue buena (AUC= 0.83 %). La figura de efectos muestra que la probabilidad de ocurrencia del tiburón puntas blancas oceánico es mayor cuando la TSM se encuentra en el intervalo de 25° y 27°C (Fig. 21 a), con valores de Chl-a altos (Fig. 21 b), durante eventos de El Niño

intensos (Fig. 21 c). Por otro lado, la probabilidad de ocurrencia de la especie disminuye hacia el final del periodo de estudio (Fig. 21 f), y se incrementa en zonas oceánicas (Fig. 21 g).

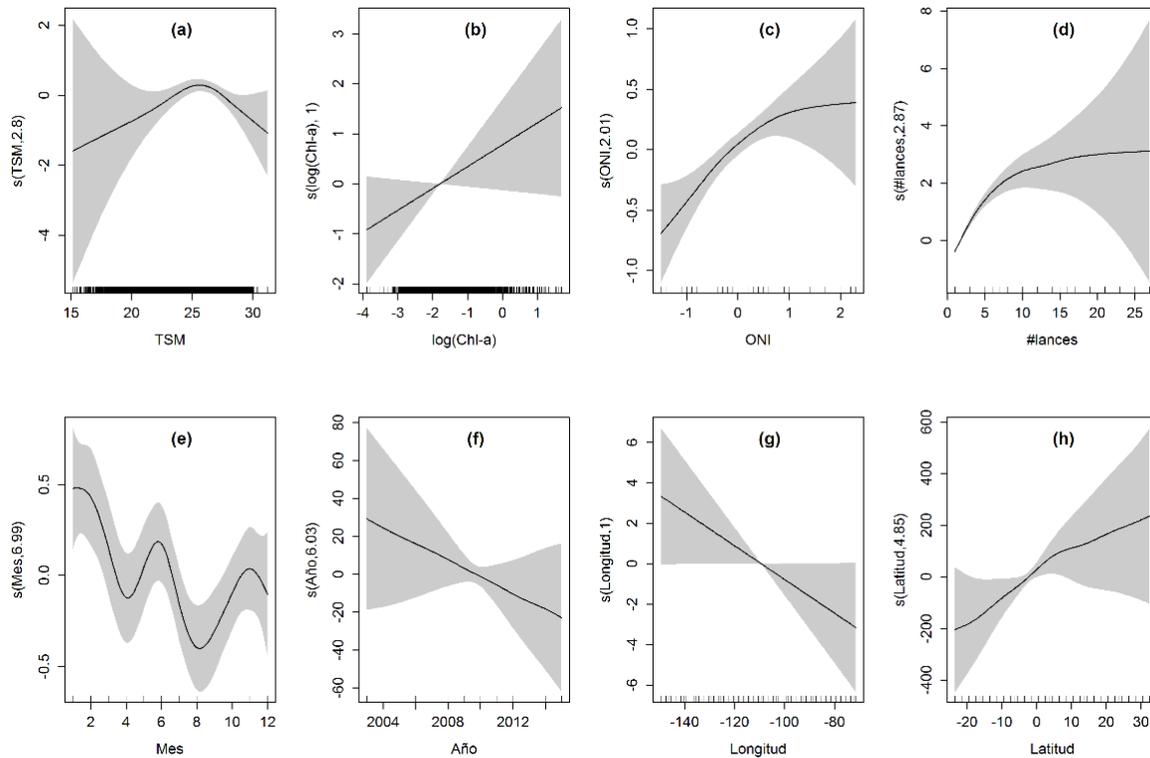


Figura 21. Figura de efectos parciales del modelo de ocurrencia de *Carcharhinus longimanus*.

VIII.8.3 *Sphyrna lewini*

El efecto que tienen las variables predictivas sobre la presencia de *S. lewini* se muestra en la tabla IV. El valor de la devianza explicada por el modelo final fue de 20.5%. Las variables que contribuyeron más en la explicación de la presencia de *S. lewini* fueron el número de lances con el 8.78% de la devianza, seguido de la TSM con un valor de 2.85% y la Chl-a con el 2.19%. Por otro lado, la interacción longitud-año (lon, año) fue descartada del modelo final debido al aporte bajo en la explicación de la variable respuesta.

Tabla IV. Resumen de las variables explicativas utilizadas para modelar la ocurrencia de *Sphyrna. lewini* en el OPO durante 2003-2015. El orden de las variables es el que se siguió en la construcción del modelo.

	Devianza explicada total (%)	Devianza explicada parcial (%)	AIC	Δ AIC
Nulo			6086.558	
+s(TSM)	2.85	2.85	5925.913	160.64
+s(log(Chl-a))	5.04	2.19	5801.137	124.77
+s(ONI)	5.42	0.38	5790.783	10.35
+s(#lances)	14.20	8.78	5255.320	535.46
+s(Mes)	15.30	1.10	5214.775	40.54
+s(Año)	15.70	0.40	5188.892	25.88
+s(Longitud)	17.10	1.40	5115.613	73.27
+s(Latitud)	17.80	0.70	5088.765	26.84
+s(Lon,Lat)	19.30	1.50	5029.705	59.06
+s(Lon, Año)	19.50	0	5030.659	-0.95
+s(Lat,Año)	20.5	1.2	4991.389	39.27

El modelo final quedó de la siguiente manera:

$$\text{Logit} ([P/A \text{ S. lewini}]) = s(\text{TSM}) + s(\log(\text{Chl-a})) + s(\text{ONI}) + s(\#\text{lances}) + s(\text{Mes}) + s(\text{Año}) + s(\text{Longitud}) + s(\text{Latitud}) + s(\text{lon,lat}) + s(\text{lat,año}) + \varepsilon$$

La evaluación del modelo de ocurrencia de *S. lewini* fue buena (AUC= 0.82%). La figura 22 muestra que la probabilidad de ocurrencia de la cornuda común aumenta cuando la TSM se encuentra entre los 24° y 26°C (Fig. 22 a), cuando la Chl-a presenta valores bajos (Fig. 22 b) y durante eventos La Niña (Fig. 22 c). Se observa también que en general la probabilidad de captura es mayor a medida que aumenta el número de lances (Fig. 22 d). Por último, la figura de efectos muestra un ligero aumento de las capturas al final de la serie de tiempo (Fig. 22 f).

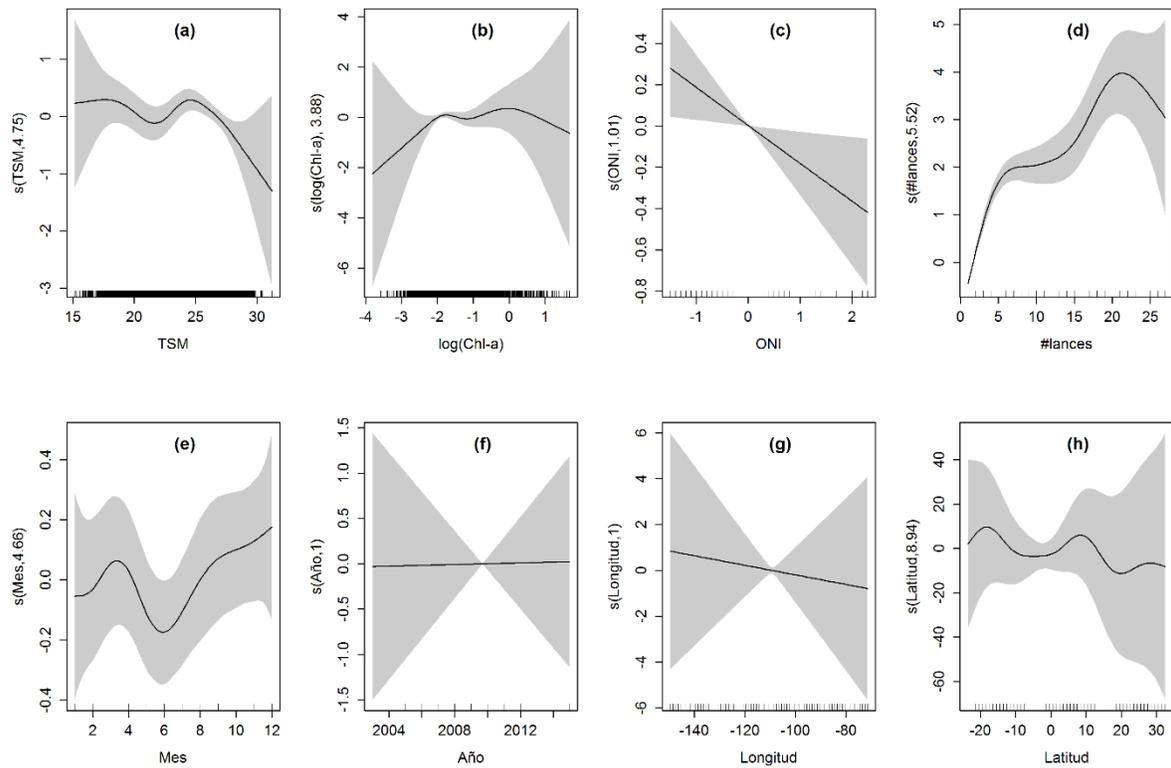


Figura 22. Figura de efectos parciales del modelo de ocurrencia de *Sphyryna lewini*.

VIII.8.4 *Sphyryna zygaena*

El efecto que tienen las variables predictivas sobre la presencia de *S. zygaena* se muestra en la tabla V. El modelo de ocurrencia final de *S. zygaena* explicó el 23.7% de la devianza total. Las variables que contribuyeron más en la explicación de la presencia de la especie fueron el número de lances con el 10.02% de la devianza, seguido de la TSM con un valor de 5.3% y la Chl-a con el 2.4%. Por otro lado, la interacción latitud-año (lat, año) fue descartada del modelo final debido al aporte bajo en la explicación de la variable respuesta.

Tabla V. Resumen de las variables explicativas utilizadas para modelar la ocurrencia de *Sphyrna zygaena* en el OPO durante 2003-2015. El orden de las variables es el que se siguió en la construcción del modelo.

	Devianza explicada total (%)	Devianza explicada parcial (%)	AIC	Δ AIC
Nulo			6893.930	
+s(TSM)	5.3	5.3	6516.766	377.16
+s(log(Chl-a))	7.7	2.4	6359.841	156.92
+s(ONI)	8.28	0.58	6336.170	23.67
+s(#lances)	18.3	10.02	5662.922	673.24
+s(Mes)	19.5	1.2	5594.657	68.26
+s(Año)	19.7	0.2	5579.508	15.14
+s(Longitud)	21.4	1.7	5470.378	109.13
+s(Latitud)	22.1	0.7	5434.129	36.24
+s(Lon,Lat)	23.3	1.2	5379.592	54.53
+s(Lon, Año)	23.7	0.4	5368.975	10.61
+s(Lat, Año)	23.7	0	5369.447	-0.47

El modelo final quedó de la siguiente manera:

$$\text{Logit} ([P/A \text{ S. zygaena}]) = s(\text{TSM}) + s(\log(\text{Chl-a})) + s(\text{ONI}) + s(\text{\#lances}) + s(\text{Mes}) + s(\text{Año}) + s(\text{Longitud}) + s(\text{Latitud}) + s(\text{lon,lat}) + s(\text{lon,año}) + \varepsilon$$

La evaluación del modelo de ocurrencia de *S. zygaena* fue buena (AUC= 0.88%). La probabilidad de ocurrencia de la cornuda prieta aumenta cuando la TSM presenta valores de 23° – 25°C (Fig. 23 a), cuando la Chl-a presenta valores bajos (Fig. 23 b) y durante eventos El Niño (Fig. 23 c). Un panorama general muestra un aumento de la probabilidad de captura de la especie conforme aumenta el número de lances (Fig. 23 d), sin embargo disminuye a partir de los 20 lances. Finalmente, se presentó una disminución de la probabilidad de ocurrencia al final de la serie de tiempo (Fig. 23 f).

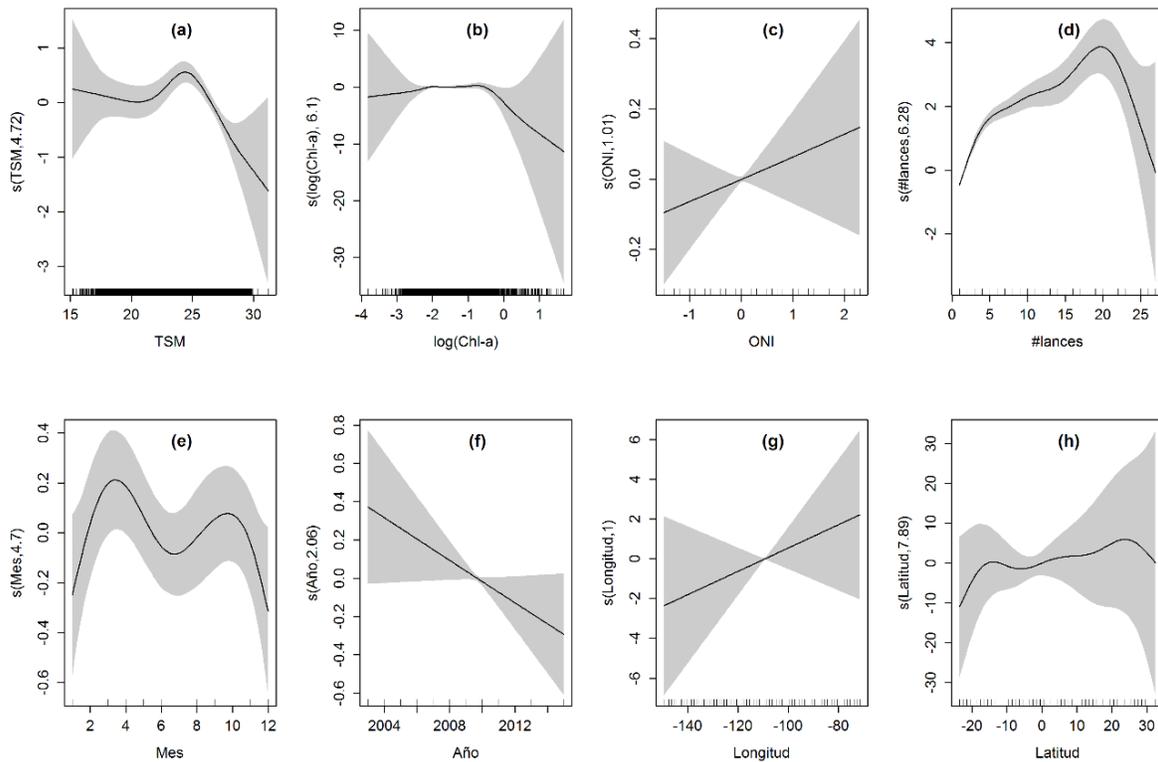


Figura 23. Figura de efectos parciales del modelo de ocurrencia de *Sphyrna zygaena*.

VIII.9. Predicciones y detección de hotspots

VIII.9.1 *Carcharhinus falciformis*

Las predicciones de la probabilidad de ocurrencia de *C. falciformis* (Fig. 24) identificaron una zona importante en el área de estudio (entre 120° – 135°O y 10° – 25°N), la cual se mantuvo durante los cuatro trimestres del año con variaciones estacionales en cuanto a su cobertura. Se puede observar una cobertura mayor de altas probabilidades (>0.88) de ocurrencia del tiburón piloto durante el primer trimestre del año (Fig. 24 A) para luego disminuir gradualmente durante el segundo y tercer trimestre (Figs. 24 B y 24 C) hasta volverse a incrementar durante el cuarto trimestre (24 D). En general, el modelo predice que *C. falciformis* es una especie

vulnerable en casi en la totalidad de la zona de operación de la flota atunera, principalmente por encima del ecuador.

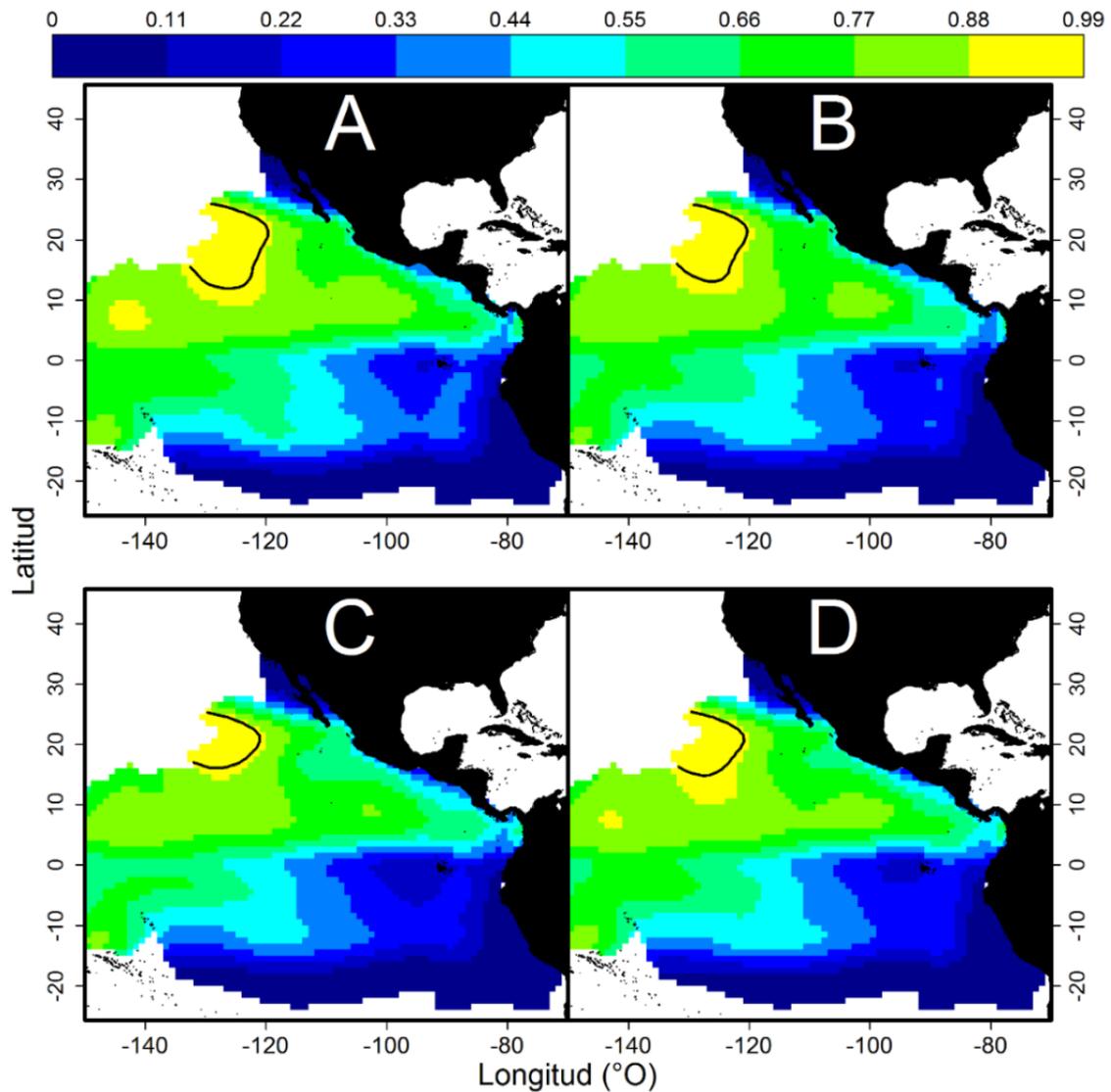


Figura 24. Mapas estacionales de predicción de probabilidad de ocurrencia del modelos GAM ajustado a la presencia/ausencia de *Carcharhinus falciformis* para el periodo 2003-2015. Los contornos representan las áreas consideradas como hotspots (>95% del cuantil del vector de predicción).

Aquellos cuadrantes que se encontraron por encima del 95% del cuantil de probabilidad fueron considerados como hotspots (Fig. 25). Se observa una

preferencia clara de hábitat del tiburón piloto en intervalos de TSM de 22° – 27°C (Fig. 25 a), 0.07 – 0.3 mg m⁻³ de Chl-a (Fig. 25 b), valores del ONI entre -0.5 – 0.5 (Fig.25 c), entre los 120° – 130°O y entre los 15° –25°N principalmente (Figs. 25 d y 25 e).

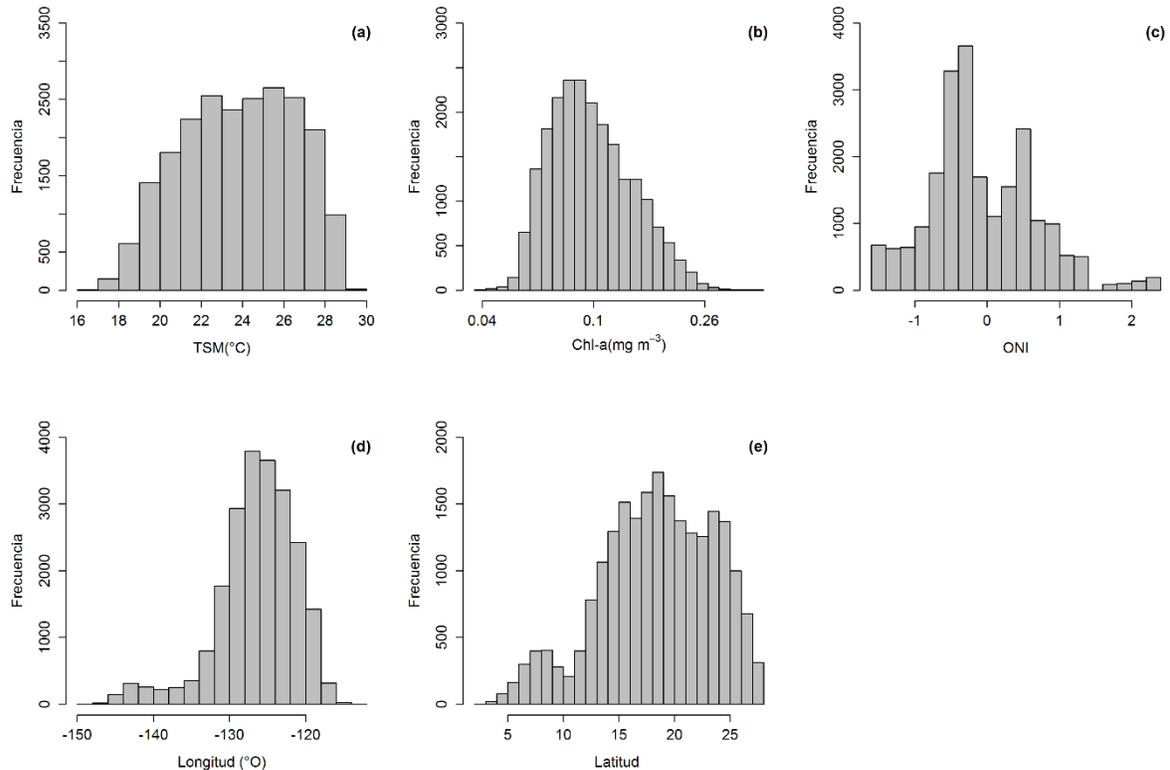


Figura 25. Distribución de frecuencias de las celdas consideradas hotspots (>95% del cuantil) de *Carcharhinus falciformis* para la TSM (a), Chl-a (b), ONI (c), longitud (d) y latitud (e).

VIII.9.2 *Carcharhinus longimanus*

Las predicciones de la probabilidad de ocurrencia de *C. longimanus* (Fig. 26) indican diferentes zonas importantes en el océano abierto a lo largo de una franja sobre los 10°N, sobre la línea del ecuador y sobre la línea de los 15°S. Las predicciones indican variación estacional en los valores de la probabilidad de ocurrencia en estas zonas. Se observa que durante el primer trimestre (Fig. 26 A) el tiburón puntas

blancas oceánico tiene más probabilidad de ser capturado por la flota atunera. La menor probabilidad de ocurrencia de la especie se presentó durante el tercer trimestre (Fig. 26 C)

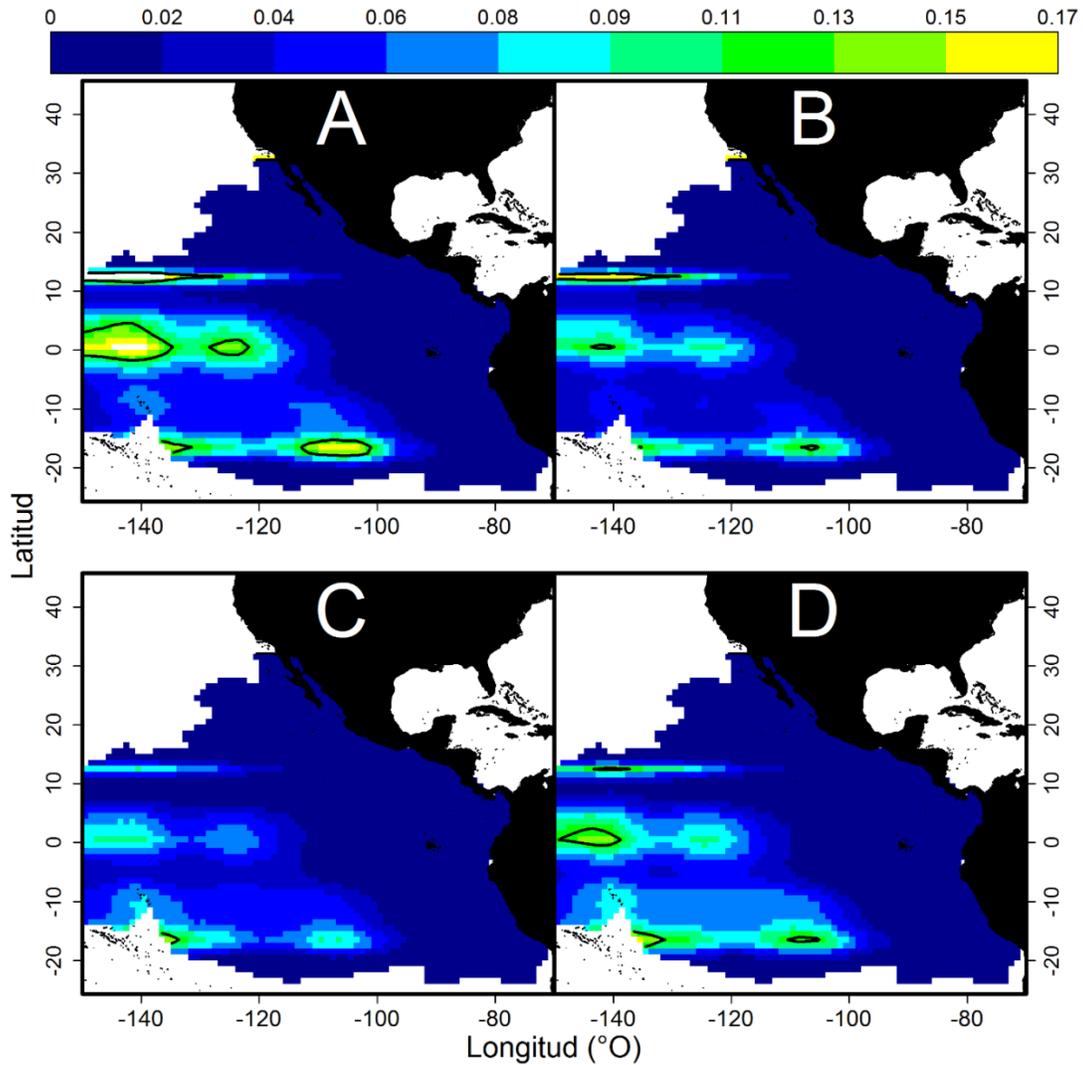


Figura 26. Mapas estacionales de predicción de probabilidad de ocurrencia del modelo GAM ajustado a la presencia/ausencia de *Carcharhinus longimanus* para el periodo 2003-2015. Los contornos representan las áreas consideradas como hotspots (>95% del cuantil del vector de predicción).

En la figura 27 se muestra la preferencia de hábitat obtenida del 95% del cuantil del vector de probabilidad del modelo de ocurrencia de *C. longimanus* en aquellas celdas

consideradas como hotspots. Como se puede observar, esta especie presentó preferencias ambientales de 25 – 27°C de TSM (Fig. 27 a), valores menores a 0.3 mg m⁻³ de Chl-a (Fig. 27 b), durante años moderados El Niño (Fig. 27 c), entre los 120° y 150°O y entre los 20°S y 15°N (Figs. 27 d y 27 e).

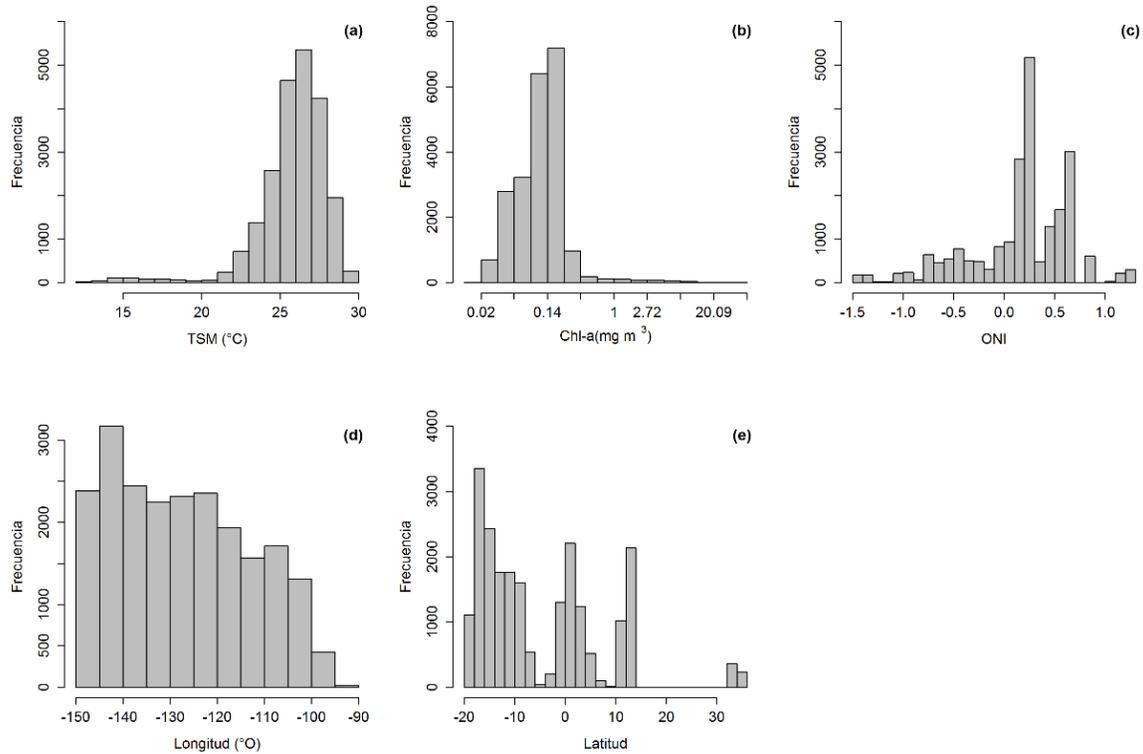


Figura 27. Distribución de frecuencias de las celdas consideradas hotspots (>95% del cuantil) de *Carcharhinus longimanus* para la TSM (a), Chl-a (b), ONI (c), longitud (d) y latitud (e).

VIII.9.3 *Sphyrna lewini*

Las predicciones de la probabilidad de ocurrencia de *S. lewini* (Fig. 28) identificaron tres zonas importantes en el área de estudio, las cuales se mantuvieron presentes durante los cuatro trimestres del año con variaciones estacionales en cuanto a la cobertura espacial y los valores de probabilidad. La mayor probabilidad se presenta

durante el cuarto trimestre (Fig. 28 D) en la costa occidental de la península de Baja California, dentro del golfo de California y cerca de las costas de Perú.

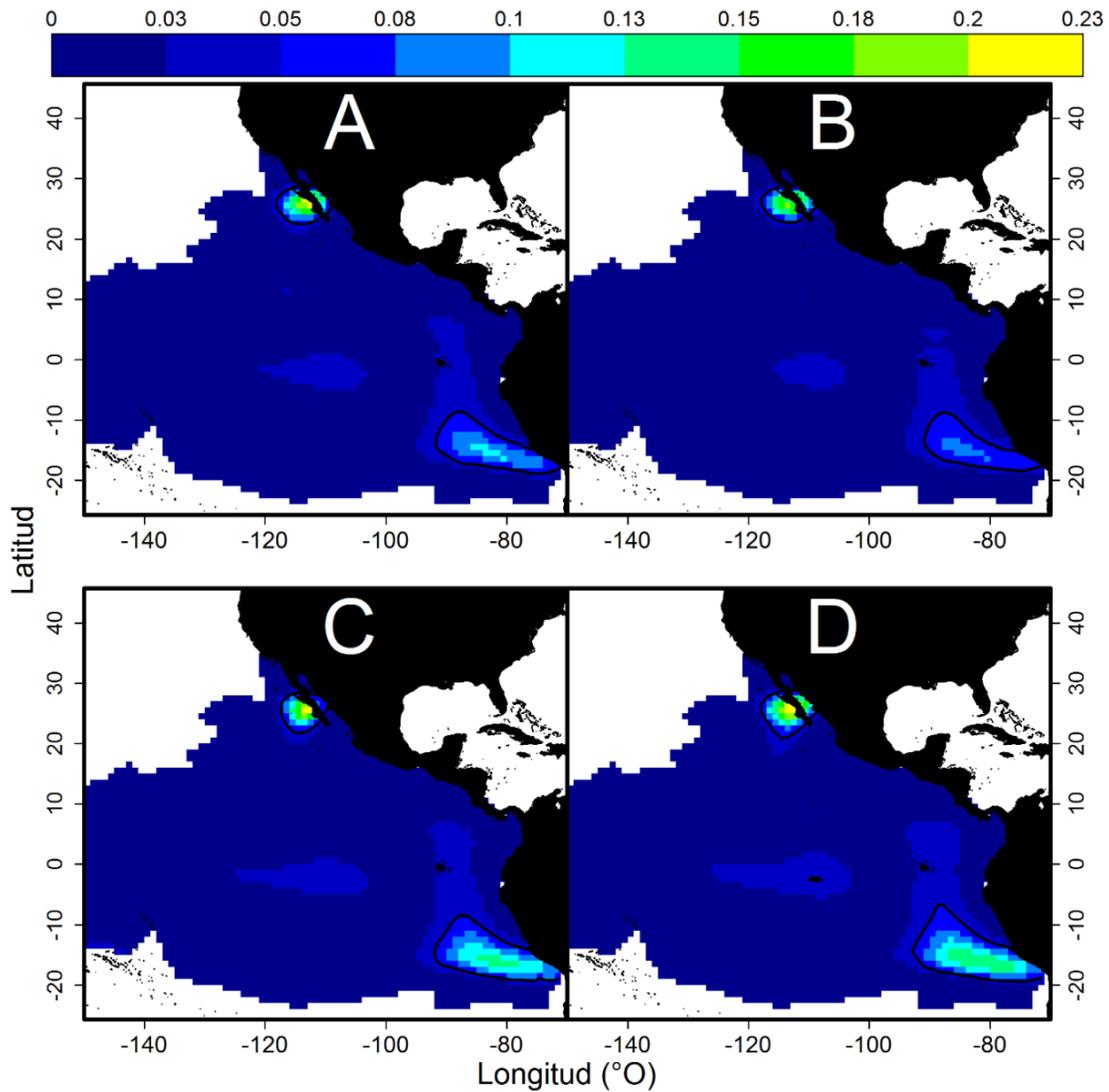


Figura 28. Mapas estacionales de predicción de probabilidad de ocurrencia del modelo GAM ajustado a la presencia/ausencia de *Sphyrna lewini* para el periodo 2003-2015. Los contornos representan las áreas consideradas como hotspots (>95% del cuantil del vector de predicción).

Aquellos cuadrantes que se encontraron por encima del 95% del cuantil de probabilidad considerados como hotspots (Fig. 29) muestran una clara preferencia de

hábitat de la cornuda común en intervalos de TSM de 18° – 25°C (Fig. 29 a), 0.2 – 0.3 mg m⁻³ de Chl-a (Fig. 29 b), con valores del ONI principalmente positivos (Fig. 29 c) aunque también se detectan probabilidades altas en valores negativos (-0.3 – 0.6), entre los 70° – 90°O y entre los -110° – 120°O y entre los 20°– 30°N y 10° – 20°S (Figs. 29 d y 29 e).

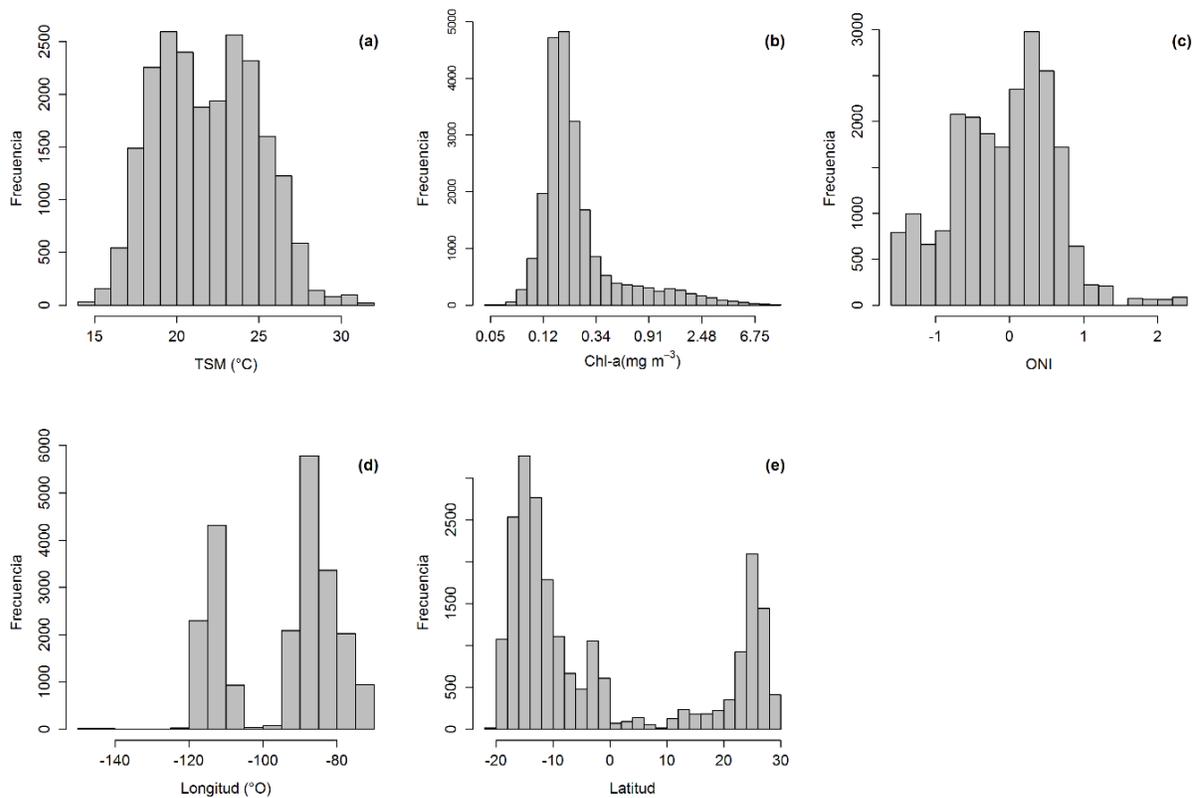


Figura 29. Distribución de frecuencias de las celdas consideradas hotspots (>95% del cuantil) de *Sphyrna lewini* para la TSM (a), Chl-a (b), ONI (c), longitud (d) y latitud (e).

VIII.9.4 *Sphyrna zygaena*

En los mapas de predicciones de la probabilidad de ocurrencia de *S. zygaena* (Fig. 30) se identificaron cuatro zonas importantes en el área de estudio con variaciones estacionales. La primera y más importante se presenta en aguas oceánicas frente a la península de Baja California, la cual se mantuvo presente durante todo el año. La segunda zona se encuentra en la boca del golfo de California. Esta zona se vuelve

notoria en el primer trimestre (Fig. 30 A), aumenta la probabilidad durante el segundo trimestre (Fig. 30 B) para desaparecer durante el tercer y cuarto trimestre (Figs. 30 C y 30 D).

La tercera zona importante se detectó cerca de las islas Galápagos durante el segundo trimestre (Fig. 30 B). Por último, se encontró una zona cerca a las costas de Perú que se mantiene presente todo el año, con mayor probabilidad de ocurrencia durante el segundo trimestre.

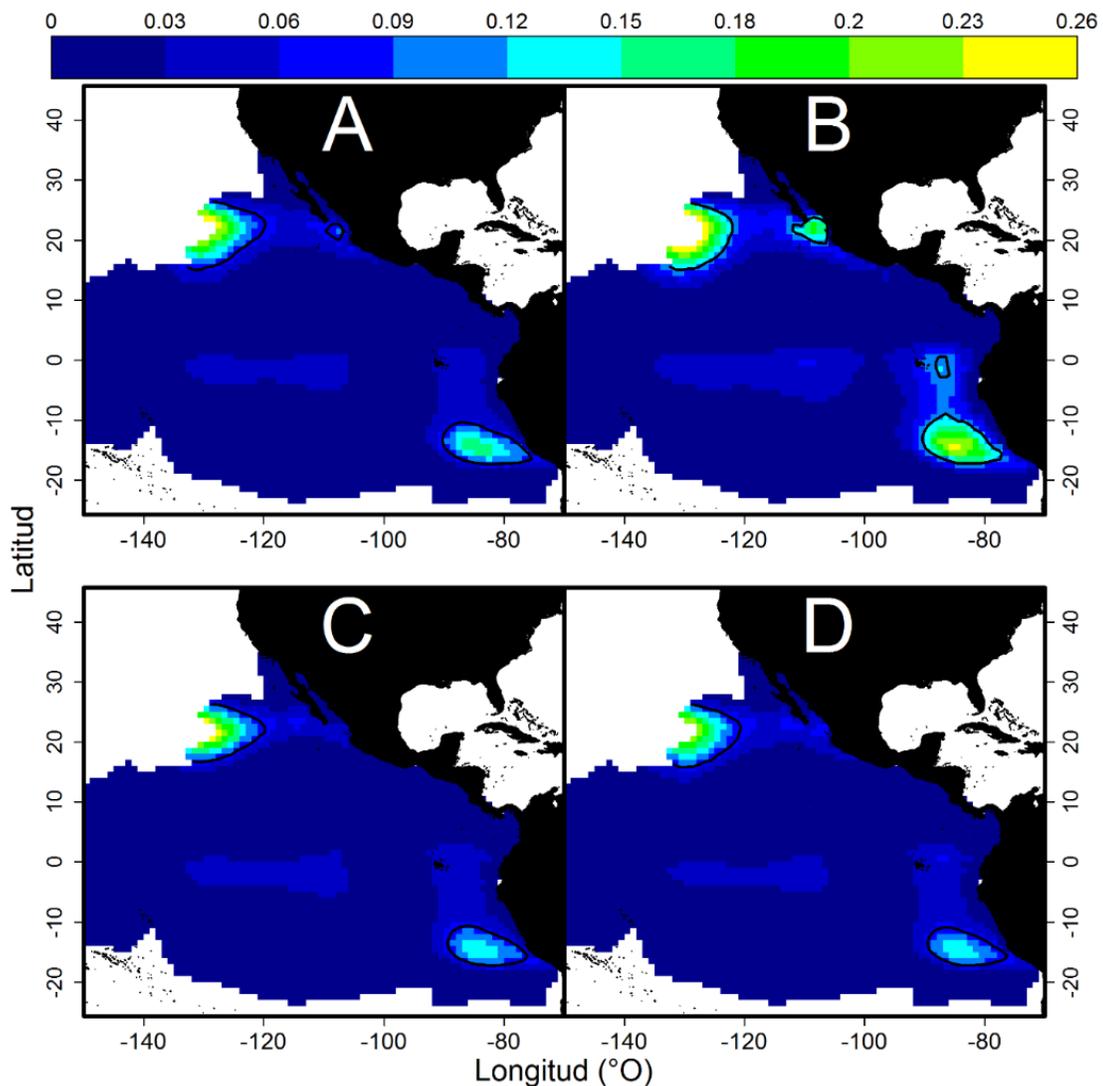


Figura 30. Mapas estacionales de predicción de probabilidad de ocurrencia del modelo GAM ajustado a la presencia/ausencia de *Sphyrna zygaena* para el periodo 2003-2015. Los contornos representan las áreas consideradas como hotspots (>95% del cuantil del vector de predicción).

Las celdas que se encontraron por encima del 95% del cuantil del vector de probabilidad de *S. zygaena* considerados como hotspots (Fig. 31) muestran que la especie presenta una preferencia de hábitat en intervalos de TSM de 20° – 25°C (Fig. 31 a), 0.05 – 0.2 mg m⁻³ de Chl-a (Fig. 31 b), con valores del ONI negativos y positivos (Fig. 31 c), entre los 120° – 130°O y entre los 80° – 90°O y entre los 20° – 30°N y 10° – 20°S (Figs. 31 d y 31 e).

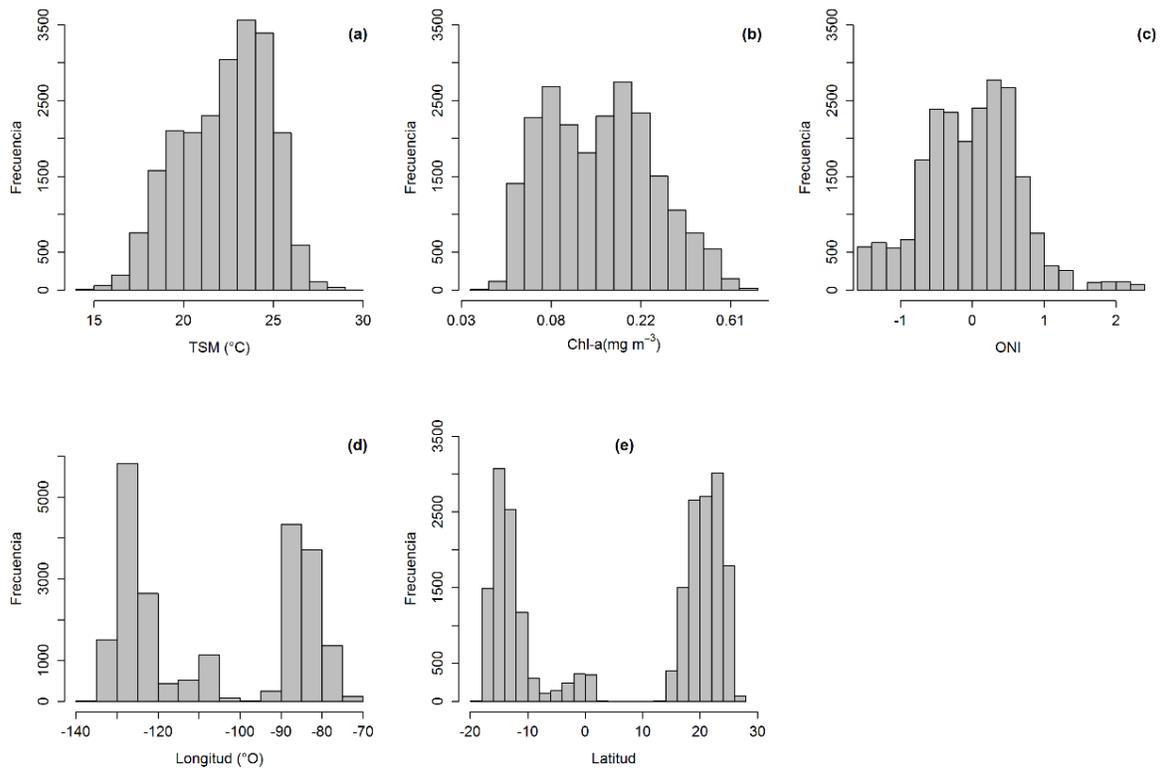


Figura 31. Distribución de frecuencias de las celdas consideradas hotspots (>95% del cuantil) de *Sphyrna zygaena* para la TSM (a), Chl-a (b), ONI (c), longitud (d) y latitud (e).

En la figura 32 podemos observar que hay ciertas zonas dentro del OPO en donde el modelo predice la interacción o traslape de hotspots de las especies más representativas de la captura incidental de tiburones, reportada por la flota internacional que pesca atunes con red de cerco. La zona en donde se traslaparon

más especies se localiza entre los 120-140°O y entre los 15-25°N aproximadamente. En este sitio el modelo predijo hotspots de *C. falciformis*, *C. longimanus* y *S. zygaena*. El segundo sitio de importancia es en las costas de Perú. Aquí se observa la el traslape de *S. lewini* y *S. zygaena*.

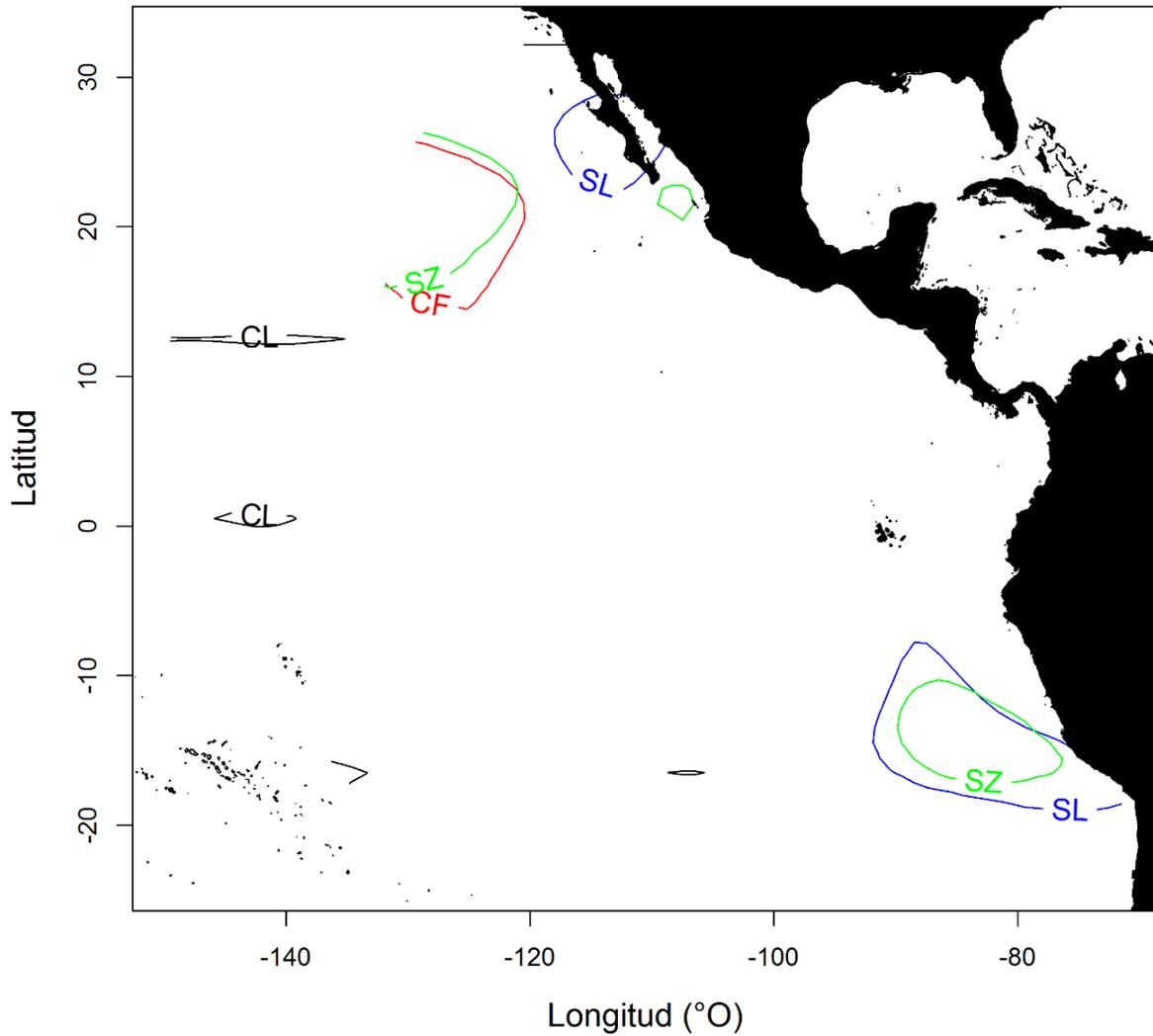


Figura 32. Traslape de hotspots de *Carcharhinus falciformis* (CF), *Carcharhinus longimanus* (CL), *Sphyrna lewini* (SL) y *Sphyrna zygaena* (SZ) en el OPO.

IX. DISCUSIÓN

IX.1. Descripción espacial y temporal del esfuerzo de pesca

Los resultados de este estudio sugieren una tendencia en aumento del número de lances realizados sobre objetos flotantes en el OPO durante el periodo 1993-2015. A principios de la década de los 90's, la mortalidad alta de delfines derivada de la actividad pesquera, ocasionó la generación de leyes y acuerdos para su protección (CIAT, 1989). Ante esta problemática, se implementaron alternativas como la pesca sobre brisa y sobre objetos flotantes (Arenas, *et al.*, 1992). Esto puede explicar, en parte, el aumento observado en el promedio anual de los lances. De igual manera, el mejoramiento tecnológico en la detección de objetos flotantes a la deriva y el aumento en la utilización de los dispositivos agregadores de peces FADs (por sus siglas en inglés) principalmente en la porción sur del OPO, provocó una expansión del esfuerzo pesquero en el área de estudio (Lennert-Cody *et al.*, 1999; Solana-Sansores, 2001b).

La variación temporal observada en la distribución espacial de los lances puede estar relacionada con diferentes factores como la precipitación y el flujo de los ríos, así como con las actividades humanas. Adicionalmente, la circulación de las masas de agua y la estacionalidad del viento, también pueden afectar la distribución y acumulación de objetos flotantes en el área de estudio (Arenas, *et al.*, 1992). De acuerdo a los resultados de este trabajo, la mayor frecuencia de objetos flotantes se presentó a partir del segundo trimestre en zonas cercanas a la franja ecuatorial, desde la costa hacia zonas oceánicas. Este patrón presenta cierta similitud con lo reportado por Solana-Sansores (2001b) para el periodo 1987-1997. De la Rosa (1995) menciona que la probabilidad de encontrar objetos flotantes a la deriva en esta zona es mayor debido a los aportes grandes de agua dulce que llegan al OPO a través de desembocaduras de ríos, mismos que llevan consigo cantidades altas de vegetación costera de selvas tropicales. Hoffman (1975) menciona que durante los meses de mayo a octubre se presentan aportes significativos de precipitación (3200 mm al año) en las costas de Colombia, Ecuador, Panamá y Costa Rica. Esta información ayuda a explicar la concentración alta de lances en esta zona.

De nueva cuenta, Hofman (1975) menciona que las costas del sur del área de estudio reciben poca precipitación. En este caso, la mayoría de los lances pueden haber sido realizados sobre los FADs, los cuales son “sembrados” en esta zona por la flota atunera internacional con el objetivo de que circulen en sentido del giro anticiclónico del Pacífico sur (Solana-Sansores, 2001a).

Por otro lado, los resultados obtenidos en el presente estudio difieren con lo reportado por Zarate-Villafranco (1998), quien encontró una distribución principalmente en zonas costeras de México, y a su vez Martínez-Rincón (2008) menciona que la mayoría de estos lances se realizaron en aguas oceánicas frente a la parte sur de la costa occidental de la península de Baja California. Es probable que las diferencias encontradas con estos autores, pudieron deberse a los años analizados en cada trabajo y a que ambos autores analizaron datos exclusivamente de la flota atunera mexicana, mientras que en el presente estudio se analizaron datos de la flota internacional. Sin embargo, no se cuenta con los datos suficientes para corroborar esta información.

IX.2. Descripción de la captura incidental de tiburones

Los atunes frecuentemente se encuentran asociados con otras especies, comportamiento que puede servir para reducir la presión de depredación o incrementar el éxito en la alimentación (Nikolsky, 1963). Desde la implementación de la pesca de atún sobre objetos flotantes, los lances sobre este indicador generan una mayor cantidad de captura incidental tanto en volumen de captura como en diversidad de especies, como tiburones, picudos, dorados y wahoos, entre otros (Romanov, 2002; Hall *et al.*, 1999). De acuerdo a la información generada por observadores de la CIAT, a bordo de buques que pescan atún con red de cerco en el OPO durante 2000-2001, cerca del 56% de las capturas incidentales de tiburones estuvieron conformadas por *C. falciformis*, el 21% por el tiburón *C. longimanus*, el 3.6% y 1.7% para los tiburones martillo *S. lewini* y *S. zygaena* respectivamente y en menor porcentaje (0.7%) para tiburones zorro del género *Alopias* (Román-Verdesoto y Orozco-Zoller, 2005). Estos datos son similares a lo reportado por otros autores (Kato, 1964; CIAT, 2010; Martínez-Rincón, 2012) y a los resultados obtenidos en el

presente estudio, en donde *C. falciformis* y *C. longimanus* fueron las especies de tiburones más capturadas por la flota cerquera en el OPO durante 1993-2015.

Por otro lado, Solana Sansores (2001a) menciona a *C. limbatus* y *C. falciformis* como las principales especies capturadas en esta pesquería sobre los objetos flotantes durante 1993-1997 y a *C. longimanus*, y *Sphyrna spp* como especies que se asocian a objetos flotantes ocasionalmente. Por su parte, Chong-Robles (2006) reportó al tiburón puntas negras, al tiburón puntas blancas oceánico, al tiburón piloto, y el tiburón *Sphyrna spp* como los más representativos en la pesquería de atún, durante 1998-2004, asociados principalmente a objetos flotantes.

Estas diferencias encontradas pueden deberse a que existe cierta confusión en la identificación del tiburón piloto y el tiburón puntas negras (Román-Verdesoto y Orozco-Zoller, 2005), lo cual puede tener como consecuencia un sesgo en la comparación de estudios realizados utilizando fuentes distintas de información.

IX.3. Tendencia de la captura incidental por unidad de esfuerzo

En comparación con los tiburones costeros y los atunes capturados en las pesquerías de alta mar, para muchas poblaciones de tiburones pelágicos no existen datos sobre tendencias en abundancia o los datos disponibles engloban periodos de tiempo esporádicos, son poco confiables o contradictorios; sin embargo, para las pocas poblaciones que han sido estudiadas, la mayoría ha mostrado una tendencia decreciente (Camhi, *et al.*, 2008).

El tiburón *C. falciformis*, catalogado dentro de la lista roja de la IUCN como vulnerable, es una de las especies más comunes que se capturan incidentalmente en la pesquería del atún tropical. Las capturas de esta especie presentan un aumento en la costa atlántica de México; Bonfil *et al.*, (2008a) reporta en su estudio del análisis de poblaciones virtuales en el océano Pacífico una captura estimada de la especie de 13,000 – 20,000 t, sin encontrar una tendencia de la Captura por unidad de esfuerzo (CPUE) durante 1992-1998. Sin embargo esta estimación resultó ser mayor a lo estimado para el periodo 1967-1970. Los resultados coinciden con lo reportado en el presente estudio, en donde *C. falciformis* presentó una tendencia a aumentar en un promedio anual de 47.8%. Por otro lado, la CIAT (2017) menciona

que la CIPUE de esta especie presentó un decremento en el año 2016 con respecto al 2015 para aquellos organismos capturados por encima de la línea ecuatorial. Para aquellos capturados al sur de la línea ecuatorial (OPO sur) la CIPUE sigue alrededor del nivel 2014-2015.

Algunos estudios sugieren un decremento poblacional de *C. longimanus* (por ejemplo, en el Golfo de México), pero en general se desconoce su estado actual (Bonfil *et al.*, 2008b). A pesar de esto, la IUCN lo cataloga como una especie vulnerable. La información colectada por observadores a bordo de la CIAT entre 1993-2004 en el OPO de las maniobras de la pesca de atún con red de cerco, indica que esta especie representó el 20.8% de las capturas incidentales de tiburones. El número de tiburones capturados durante estos 11 años fueron un total de 32,000 entre los tres indicadores de pesca (delfín, brisa y objetos flotantes). Para el caso del último indicador (objetos flotantes), la CIPUE de *C. longimanus* presentó un decline cercano al 95% (Defenders of Wildlife, 2015). Resultados similares se encontraron en el presente estudio, ya que la CIPUE de *C. longimanus* fue la única que presentó una tendencia promedio anual en declive del 5% durante los 23 años analizados, debido quizá a la fuerte presión pesquera a la que se ve sometido, ya que esta especie es capturada intencional e incidentalmente en distintas pesquerías en el OPO (Bonfil *et al.*, 2008b).

Las poblaciones de las especies de tiburón martillo *Sphyrna lewini* y *Sphyrna zygaena* están en la lista roja de IUCN a nivel mundial como en peligro de extinción y vulnerable, respectivamente (Maguire *et al.* 2006). En el caso de *S. lewini*, se han reportado disminuciones en su abundancia y capturas en el Pacífico mexicano y América central (Cook, 1990; Soriano *et al.* 2011). Myers *et al.* (2007) reportaron un decremento del 71% en las poblaciones de *S. lewini* en el Parque Nacional de las islas de Cocos (Costa Rica) entre 1992-2004. En Ecuador, los registros de capturas combinadas para *S. lewini*, *S. mokarran* y *S. zygaena* indicaron un máximo de desembarques de aproximadamente 1000 t en 1996, seguido de una disminución hasta 2001 (Herrera *et al.* 2003). En cuanto a la captura incidental de *S. lewini* por buques atuneros que usan redes de cerco en el Pacífico oriental, existe tendencia a

la baja desde una máxima de 1,009 ejemplares en 2002 a 247 ejemplares en 2011. Por otra parte, los ejemplares de *S. zygaena* alcanzaron los 1,205 en 2004 y decreció a 436 en 2011 (CIAT, 2012). No obstante que algunos trabajos que indican una disminución en las poblaciones de los tiburones martillo, en este trabajo se encontró un incremento promedio anual del 4.90% y 10.51% para *S. lewini* y *S. zygaena* respectivamente.

El aumento de la CIPUE para tres de las cuatro especies analizadas en este trabajo difiere en la mayoría de los casos con lo mencionado por otros autores, quienes reportaron disminuciones de las capturas dirigidas e incidentales de tiburones en algunas zonas del OPO. Estas diferencias pueden atribuirse en una primera instancia a la escala espacial y temporal utilizada en cada estudio. A pesar de que los resultados reportados en la presente tesis, señalaron un aumento de la CIPUE del tiburón piloto y los tiburones martillo, es importante prestar atención a las características de historia de vida de cada especie, ya que en general presentan una fecundidad baja y una edad de madurez tardía, y el hecho de que se hayan encontrado tendencias en aumento no significa que haya más organismos sino que es probable que se estén explotando zonas de altas abundancias con características ambientales ideales para cada especie, por lo que si no se toman las medidas necesarias puede traer consigo consecuencias negativas en los ecosistemas marinos.

IX.4. Descripción de la distribución espacial y temporal de la CIPUE

Los patrones en la distribución de las especies pueden presentar variaciones espaciales y temporales de acuerdo a su ciclo de vida (Castro, 1983; Hearn *et al*, 2010). Otro factor importante que hay que tener en cuenta es la presencia de posibles barreras físicas, químicas, geológicas y/o biológicas que, de alguna manera condicionan la presencia de una especie en una zona en particular, pues se sabe que la distribución y sus cambios a lo largo del tiempo están relacionados con las condiciones ambientales más favorables para cada especie (Miyabe y Bayliff, 1987). Aunado a esto, McCann (1964) menciona que las migraciones latitudinales de las

especies están relacionadas con los cambios periódicos en la circulación de las corrientes oceánicas.

La distribución espacial de la CIPUE de *C. falciformis* sugiere que esta especie presenta una distribución amplia, la cual es reflejada por los datos de captura incidental en los lances realizados sobre objetos flotantes.

Last y Stevens (1994) catalogan a la especie como abundante tanto en zonas costeras como oceánicas con hábitos altamente migratorios. A pesar de esto, los núcleos de capturas mayores que se encontraron en este trabajo se localizan al norte del ecuador, sobre los 10°N y entre los 120-140°O, principalmente durante el segundo y tercer trimestre.

Resultados similares fueron reportados en otros estudios en donde se menciona que *C. falciformis* tiene preferencias por permanecer en latitudes por encima del ecuador (Solana-Sansores, 2001a; Román-Verdesoto y Orozco-Zoller, 2005). Esto puede ser explicado por el comportamiento migratorio de esta especie, ya que se ha reportado que estos organismos migran desde el ecuador hacia latitudes mayores durante la segunda mitad del año (Strasburg, 1958).

La zona ecuatorial (0-10° N) en la cual se encontraron las mayores concentraciones de capturas, se caracteriza por presentar una productividad primaria alta debido a la surgencia generada por los vientos alisios. De acuerdo a Galván-Magaña (1999), Hall *et al.* (1999) y Bocanegra-Castillo (2007), esta es un área de diversidad alta de presas disponibles para depredadores de alto nivel trófico como atunes y tiburones, los cuales se alimentan principalmente de crustáceos, peces pequeños y calamares. Por otro lado, Reilly (1990) y Fiedler (1992) reportaron una variación mínima de la TSM a lo largo de la franja de los 10°N, y además reportaron la presencia de una termoclina somera y bien definida, fenómeno que promueve la agregación de peces y mamíferos marinos.

La disponibilidad de alimento y las características ambientales que se presentan en esta zona, además de la escasa variación de la TSM descrita (Reilly, 1990 y Fiedler, 1992), parecen ser las condiciones adecuadas para la agregación de la especie;

además Watson *et al.* (2009) mencionan que se trata de un área importante para la agregación de organismos juveniles de *C. falciformis* menores a los 90 cm de longitud total.

En cuanto a las capturas registradas en la costa occidental de la península de Baja California durante el segundo y tercer trimestre, se ha reportado que *C. falciformis* realiza migraciones hacia Baja California Sur entre julio y diciembre (Hoyos-Padilla, 2003; Jaime-Rivera, 2004), similar a lo encontrado en el presente estudio. Esta es una reconocida zona de surgencias, en donde este tipo de fenómenos se presenta de manera estacional durante invierno-primavera (Pares-Sierra y O'Brien, 1989). Estos eventos de surgencia propician la abundancia de la langostilla *Pleuroncodes planipes*, misma que ha sido reportada como una de las principales presas de la especie en el área (Cabrera-Chávez Costa, 2003).

En el caso de *C. longimanus* la CIPUE presentó una distribución oceánica prácticamente en su totalidad, en donde los parches de mayor concentración de organismos capturados se presentaron sobre los 10°N y los 10°S y entre los 100° y 130°O durante la segunda mitad del año. Sin embargo, se presentaron capturas desde los 80°O hasta los 150°O. En la actualidad, la información disponible acerca de las migraciones y movimientos de esta especie es limitada. A pesar de esto, los resultados obtenidos coinciden con algunos estudios que sugieren que la abundancia de la especie aumenta a medida que se aleja de la plataforma continental (Camhi, *et al.* 2007; Román-Verdesoto y Orozco-Zoller, 2005), ya que esta especie ha sido descrita como la única del género *Carcharhinus* con hábitos totalmente oceánicos (Bonfil, *et al.*, 2008b).

La información generada por los palangreros japoneses indica que en el Pacífico norte se capturaron hembras preñadas dentro del área que va de los 140°O-150°E, con agregaciones mayores en la parte central de esta distribución, justo por encima de los 10° N. También se capturaron tiburones recién nacidos entre el ecuador y los 20° N, principalmente en una franja estrecha justo por encima de 10°N en el Pacífico central, coincidente con las concentraciones más altas de hembras preñadas. Esto sugiere que el área entre 150° O y 180°O y ligeramente por encima de los 10°N,

podría ser un área de crianza para estos tiburones. Sin embargo, el muestreo incompleto limita una mejor definición de esta área (Bonfil *et al.*, 2008b). Esta información sugiere que la pesca incidental puede estar afectando seriamente diferentes estadios de vida y por ende la supervivencia de la especie, lo cual puede ayudar a explicar la disminución en la tendencia de la CIPUE reportada en la presente tesis.

Con respecto a las capturas que se presentaron en la costa occidental de la península de Baja California y en el golfo de Panamá, estas coinciden con la fecha en la que la contracorriente Norecuatorial se encuentra en su máxima intensidad, y el efecto de la corriente de California es débil (Wyrтки, 1966).

Por otro lado, Jaime-Rivera (2004) reportó capturas de esta especie en la costa oeste de la península solamente durante 1996-1997, mismo que correspondió a un evento intenso del fenómeno de El Niño. Esta evidencia sugiere que la TSM es una variable importante en su distribución. Es probable que, durante este tipo de eventos oceanográficos, el tiburón puntas blancas oceánico se desplace hacia el norte a zonas en donde las condiciones térmicas sean las idóneas para su desarrollo. Estos eventos han sido relacionados con las migraciones o cambios en la abundancia de diferentes especies, afectando su ciclo de vida (Lluch-Belda *et al.*, 2005). Otra posible explicación, es que *C. longimanus* se desplace a esta zona con motivos de alimentación, pues se ha reportado que en la costa occidental de la península de Baja California existe una importante pesquería de atún (Martínez-Rincón *et al.*, 2009).

La información sobre la captura de tiburones martillo en el OPO que ha sido recopilada de la pesca de atunes es limitada, y generalmente los estudios agrupan la información de las capturas de las especies *S. lewini*, *S. zygaena* y *Spyrna mokarran* a nivel género, lo que limita el alcance de la discusión de los trabajos sobre esas especies de tiburón.

Los resultados que se presentan en este trabajo indican que ambas especies (*S. lewini* y *S. zygaena*) son capturadas principalmente al sur del OPO en zonas cercanas a las costas de Perú, principalmente durante la primera mitad del año y con

un desplazamiento hacia el noroeste durante el tercer y cuarto trimestre; esto ha sido reportado por Román-Verdesoto y Orozco-Zoller (2005). Al respecto, Solana-Sansores (2001a) menciona que las capturas incidentales mayores de este género se presentan en zonas costeras al sur del OPO, y que sus capturas son poco abundantes y ocasionales en la pesquería de atún con red de cerco.

El área de capturas cercana a las costas de Perú se ve fuertemente influenciada por la corriente de Humboldt. Esta zona es considerada como uno de los lugares con mayor productividad biológica ya que produce más del 10 % de las capturas de peces en el mundo (Chávez *et al.*, 2008). Aunado a esto, Zuta y Guillén (1970) mencionan que las temperaturas en general se incrementan hacia el oeste y hacia el norte, lo cual se observa en las imágenes satelitales de TSM del área de estudio. Además, los autores mencionan la presencia de una lengua de agua cálida en esta zona durante el primer semestre del año, lo que da lugar a temperaturas de ~23° C en la zona costera y temperaturas por encima de 24° C en zonas alejadas de la costa. Estos datos coinciden con los meses de capturas mayores en zonas cercanas a la costa encontrados en este estudio. Por otra parte, durante los meses del tercer trimestre regresan las condiciones frías en el área, lo cual coincide con el desplazamiento de las capturas hacia el norte. Nuevamente se presentaron características que pueden indicarnos que ambas especies del género *Sphyrna* siguen un patrón estacional de la TSM.

IX.5. Caracterización ambiental del área de estudio

IX.5.1. Temperatura superficial del mar

En cuanto al análisis de la TSM en el área de estudio, se observó un patrón estacional en donde se lograron detectar algunas características oceanográficas, las cuales ocurrieron a distintas escalas espacio temporales. Los valores más altos de temperatura (isoterma de 28°C) se presentaron durante el tercer trimestre en lo que se conoce como alberca de agua cálida, la cual corresponde a la región comprendida entre la punta de la península de Baja California y la lengua de agua fría ecuatorial (Wang y Fiedler, 2006). Tal y como se observó en los resultados de este trabajo, esta

zona es conocida por presentar temperaturas superficiales promedio del mar mayores a los 27.5°C y es el resultado de un flujo de calor de oeste a este por parte de la contra corriente Norecuatorial y una débil mezcla por el viento (Wang y Fiedler, 2006). Torres-Orozco (1999) menciona que el debilitamiento de los vientos del norte durante esta época, promueve la intrusión de las masas de aguas ecuatoriales hacia latitudes mayores, lo cual explica los altos valores de TSM encontrados en el golfo de California.

En esta misma zona, a partir del cuarto trimestre y durante el primer trimestre del año se logran apreciar diferentes lenguas de agua más fría en el golfo de Tehuantepec en México, en el golfo de Papagayo en Costa Rica y en el golfo de Panamá, interrumpiendo latitudinalmente la isoterma de 28°C que caracteriza a la alberca de agua cálida; estas lenguas de agua templada son producto de los frentes fríos que se desplazan del norte y que cruzan la cordillera mesoamericana como vientos en chorro de corta duración pero de gran intensidad, los cuales aportan grandes cantidades de energía al océano desplazando el agua cálida superficial y dando origen a surgencias y a la formación de parches de agua fría. Además de las temperaturas relativamente bajas, esto tiene como consecuencia la formación de remolinos oceánicos ciclónicos y anticiclónicos (Trasviña *et al.*, 2003; Kessler, 2006). En la parte norte y sur del área de estudio se detectaron las zonas con la TSM más baja. Específicamente en la costa occidental de la Península de Baja California en la región norte, se registraron valores aproximados de 18°C durante el primer y segundo trimestre. Para explicar este fenómeno, Wirtky (1965) menciona que durante el primer semestre del año la corriente de California, la cual es considerada como la porción este del gran giro anticiclónico del Pacífico norte, es impulsada por los vientos del noroeste. Durante esta época del año, la corriente de California se encuentra completamente desarrollada, provocando surgencias a lo largo de la costa. De estos eventos de surgencia pueden desprenderse filamentos de agua fría que pueden detectarse a cientos de kilómetros mar adentro.

En las costas de Perú se detectó la otra zona que presentó las menores temperaturas en el área de estudio. Esta región se ve influenciada por la corriente de Humboldt, la cual es considerada como la parte noreste del gran giro anticiclónico del

Pacífico sur. Wirtky (1965) menciona que esta corriente presenta la mayor intensidad de abril a septiembre, misma que ocasiona fenómenos importantes de surgencia.

Algunos estudios mencionan que la lengua de agua fría ecuatorial se centra directamente en el ecuador al oeste de los 120°O –la cual se logra apreciar en las imágenes de TSM y Chl-a– y ligeramente al sur del ecuador al este de esta longitud. Se menciona que las propiedades del agua superficial aquí son determinadas por la advección estacional del agua más fría de la corriente de Humboldt y las surgencias ecuatoriales (Wyrki, 1966, 1981). La temperatura de la lengua de agua fría disminuye hacia el este a medida que las aguas progresivamente más frías se elevan desde la corriente de Cromwell (Kessler, 2006; Sloyan *et al.*, 2003).

IX.5.2. Concentración de clorofila-a

A pesar de que el OPO ha sido considerado como una zona oligotrófica debido a la baja cantidad de nutrientes en la superficie (Thomas, 1977), se logró detectar algunas zonas de alta concentración de Chl-a, las cuales presentaron variación estacional en su actividad.

En la parte norte, se detectó una zona de surgencias a todo lo largo de la costa occidental de la península de Baja California. Algunos autores mencionan que estas surgencias costeras se presentan casi todo el año (Wyrki, 1966; García y Gaxiola, 2002) con una mayor intensificación durante la primera mitad del año por efecto de los vientos del norte y el flujo máximo de la corriente de California (Norton *et al.*, 1985).

Dentro del golfo de California también se observaron niveles altos de Chl-a con variación espacio temporal. Para esta zona se han reportado inversiones estacionales de los vientos, los cuales producen surgencias en la costa occidental durante el otoño por efecto de los vientos del norte y en la costa oriental incluyendo Bahía Banderas en la boca del golfo durante la primavera, por efecto de los vientos provenientes del sureste (Molina-Cruz, 1984).

El golfo de Tehuantepec, ubicado al sur de México, el golfo de Papagayo ubicado al norte de Costa Rica y la ensenada de Panamá, que afecta la parte este de Panamá y Colombia son tres grandes sistemas de afloramiento en el área de estudio. Wyrki

(1966) y Kessler (2006) mencionan que este fenómeno ocurre en donde la cordillera montañosa es baja y los vientos del norte que soplan como vientos en chorro de octubre a abril logran pasar através del istmo de centro América y mencionan que aunque estos tres sistemas de surgencias son producidos por los efectos de los mismos vientos, sus niveles de actividad varían independientemente. Legeckis (1986) menciona que la mayor intensidad de las surgencias se dan desde noviembre hasta marzo en el golfo de Tehuantepec, de febrero hasta abril en Panamá y de diciembre a mayo en el golfo de Papagayo; patrón estacional que coincide con lo reportado en la presente tesis.

La parte oeste de las Galápagos también posee un afloramiento por efectos de la corriente submarina Ecuatorial, misma que emerge a la superficie cuando choca con el archipiélago (Kessler, 2006). La surgencia ecuatorial es una zona importante de afloramiento de agua fría –la lengua de agua fría– que se extiende sobre el ecuador hacia el oeste del Pacífico con una intensificación durante los meses de septiembre y octubre, tal y como se observa en los mapas de Chl-a presentados en este estudio. De igual forma, el sistema de surgencias ecuatoriales se ve influenciado por la convergencia de los vientos alisios del noreste y sureste. Esta zona de convergencia varía espacial y temporalmente entre los 3° – 10°N durante la primera y segunda mitad del año respectivamente (Wyrski, 1966, 1981).

En la parte sur del área de estudio se detectó la zona más amplia y con mayores niveles de Chl-a. Esta zona es considerada como el mayor sistema de afloramiento en el OPO y como uno de los sistemas más productivos en el mundo. Las altas concentraciones de Chl-a son atribuidas en parte a la surgencia de la corriente de Humbolt. Aunque los eventos de surgencias ocurren durante todo el año frente a Perú, existe una alta variabilidad oceanográfica de origen local a diferentes escalas temporales, y se ha sugerido que los eventos de surgencia son más intensos durante el segundo semestre del año (Graco *et al.*, 2007).

Por otro lado, las dos zonas con los valores mínimos de Chl-a ubicadas entre los 110° – 150°O y 10° – 30°N y entre los 80° – 150°O y 10° – 20°S coinciden espacialmente con la porción central de los giros anticiclónicos subtropicales del norte y sur. La convergencia generada por los vientos alisios mediante el transporte

de Ekman provoca un acumulamiento de agua en el centro del giro, lo que provoca su hundimiento, convirtiéndola en un área de baja productividad (Ancapichún-Hernández, 2012).

IX.6. Relación entre la CIPUE y las variables ambientales

Se encontró una correlación directa con un desfase negativo y un desfase positivo de 12 meses entre el pico de temperatura (tercer trimestre), y las capturas incidentales altas de *C. falciformis* en el área de estudio (tercer trimestre). Estos resultados coinciden con lo registrado por Brenes *et al.*, (2000) y Jaime-Rivera (2004), quienes reportaron una relación directa entre el aumento de la captura del tiburón piloto y el aumento de la TSM en el Pacífico nicaragüense y en la costa occidental de la península de Baja California respectivamente. Los resultados encontrados en la presente tesis, indican un comportamiento cíclico de las capturas incidentales del tiburón piloto, en donde cada año se concentran los organismos en un área específica. La temporada en la que se presentó la captura incidental más alta de esta especie, la cual ocurrió sobre los 10°N y entre los 120° –140°O, coincide con la época del año en que la contracorriente norecuatorial se encuentra completamente desarrollada (Wyrcki, 1966), con valores de TSM superiores a 26°C (Martínez-Rincón, 2001). Diferentes autores han atribuido el aumento de las capturas de *C. falciformis* a las masas de agua cálidas superiores a 26°C (Crow *et al.*, 1966; Brenes *et al.*, 2000; Jaime-Rivera, 2004).

Por otro lado, se encontró una correlación inversa con un desfase temporal positivo de cinco meses entre el pico de temperatura y el decremento de la captura incidental. Esto sugiere que cinco meses después (~febrero) del pico de TSM, la CIPUE disminuyó de manera considerable. Esto coincide con el periodo de invierno en el hemisferio norte en donde la contracorriente norecuatorial se debilita y la corriente de California aumenta su flujo hacia latitudes bajas (Wyrcki, 1966). Se ha reportado que la distribución de esta especie se limita a temperaturas que superan los 23°C (Last and Stevens, 1994), por lo que se esperaba que su población se desplazara hacia aguas de latitudes más bajas, cerca del ecuador y de las costas de Centro América.

Se presentó una correlación negativa con un desfase de ocho meses entre las capturas más bajas de *C. longimanus* y las temperaturas más altas. Es decir, ocho meses después del pico de TSM se presentó la menor CIPUE de este tiburón. Los resultados sugieren que la captura incidental más alta de esta especie, ocurrió durante de junio – agosto; temporada en la cual se intensifica el sistema de corrientes ecuatoriales. Como consecuencia de esta intensificación, se observaron temperaturas superiores a los 25°C en el área de capturas altas (10°N – 10°S), detectadas a través de las imágenes satelitales.

La evidencia sugiere que aproximadamente ocho meses después (~febrero) el debilitamiento del sistema de corrientes ecuatoriales y la presencia de los vientos en chorro, coinciden con la temporada en la que se presentaron las capturas más bajas del tiburón puntas blancas oceánico (Wyrski, 1966, Fiedler y Talley, 2006 y Kessler, 2006). Anteriormente Román-Verdesoto y Orozco-Zöllner (2005), Santana-Hernández *et al.*, (2013) y Bonfil *et al.*, (2008b) reportaron que esta especie tiene preferencias por habitar aguas tropicales, por lo que se espera un decremento en la abundancia relativa cuando empieza la temporada de vientos en chorro, los cuales son capaces de mezclar la columna de agua, provocando parches de agua fría con temperaturas por debajo del intervalo idóneo (25° – 28°C) de *C. longimanus* (Martínez – Rincón, 2012).

Con respecto a la CIPUE de los tiburones martillo, ambos presentaron una correlación inversa con la TSM y un desfase negativo de dos meses, lo cual puede interpretarse de la siguiente manera: las capturas incidentales más bajas de *S. lewini* y *S. zygaena* ocurrieron aproximadamente dos meses antes del pico máximo de TSM. Con ayuda de los resultados obtenidos de la distribución de la CIPUE y la variación de la TSM en el área de estudio, se puede observar que ambas especies de tiburón martillo tienen preferencias térmicas más templadas que el tiburón piloto y el tiburón puntas blancas oceánico. Las capturas más altas de los tiburones martillo se presentaron en las costas de Perú a partir del primer trimestre, mientras que las capturas incidentales más bajas se presentaron durante el cuarto trimestre, aproximadamente dos meses antes del pico de TSM que se presentó en dicha zona

durante el primer trimestre del año. El efecto de la corriente de Humboldt con temperaturas relativamente frías durante el tercer y cuarto trimestre del año (Wyrki, 1966), puede ser el factor que influye en la disminución de la captura incidental de estas especies de tiburón.

Se presentó una correlación positiva y significativa con un desfase positivo de siete meses entre la serie de tiempo de Chl-a y la serie de tiempo de la CIPUE de *C. falciformis*. Esto se puede interpretar de la siguiente manera: las capturas incidentales más altas ocurrieron siete meses después de los valores máximos de Chl-a. De igual manera, esto se puede interpretar como una relación inversa entre ambas variables, lo cual ha sido reportado para otros pelágicos mayores (Su *et al.*, 2008; Marín-Enríquez, 2012). Por otro lado, Jaime Rivera (2004) no encontró relación alguna entre las capturas de este tiburón y la Chl-a.

La información anterior coincide en parte con la variación estacional de la Chl-a registrada para el área de estudio. Mientras que la concentración de Chl-a más alta registrada en la zona de captura incidental mayor (~10°N y 120-140°O) tuvo lugar durante el primer trimestre, la CIPUE más alta se presentó durante el tercer trimestre (~siete meses después). Este fenómeno puede explicarse debido a las surgencias originadas en la zona, ocasionadas por la acción de los vientos alisios y por el flujo de la corriente de California que alcanza latitudes más bajas, en donde se encuentra con el flujo de la corriente norecuatorial formando frentes térmicos muy fuertes, dando origen a zonas de productividad biológica alta (Wyrki, 1966, Marín- Enríquez *et al.*, 2018).

Con respecto a la Chl-a, el tiburón *C. longimanus* presentó un desfase negativo de 11 meses y una correlación inversa. Es decir, 11 meses antes del pico de Chl-a se presentó la CIPUE más baja de la especie (segundo trimestre). Los resultados encontrados presentan una interpretación compleja y es probable que se estén enmascarando al realizar el análisis a una escala de tiempo trimestral, por lo que se considera conveniente realizar en un futuro una aproximación a menor escala temporal (mensual).

Por último, en el caso de los tiburones martillo se presentó una relación positiva y significativa entre las capturas y la Chl-a con un desfase negativo de 11 meses y un desfase positivo de 1 mes para *S. lewini* y *S. zygaena* respectivamente. De nueva cuenta, los resultados obtenidos presentaron una interpretación compleja, los cuales podrían indicar una relación no lineal entre las capturas y esta variable ambiental o que simplemente factores ajenos al presente análisis enmascaren la verdadera correlación entre las capturas y la variable ambiental. Para este grupo también sería conveniente realizar una aproximación utilizando escalas temporales más reducidas, o bien explorar un análisis por bandas latitudinales en donde se resalte la verdadera relación entre la Chl-a y la captura incidental.

Finalmente, los desfases encontrados entre la CIPUE de las diferentes especies con la Chl-a, pueden deberse probablemente al tiempo que le toma a la cadena trófica madurar desde un evento de surgencia hasta la proliferación de organismos del nivel trófico de las presas que son consumidas por los tiburones. Estos desfases han sido registrados anteriormente para otros pelágicos mayores. Por ejemplo Ortega-García y Lluch-Cota (1996) reportaron un desfase de tres meses entre el máximo pico de Chl-a y la abundancia del atún aleta amarilla. Marín-Enríquez (2018) reportó un desfase de uno a tres meses entre el pico de Chl-a y las mayores capturas del dorado en las costas de la península de Baja California.

IX.7. Modelación de la ocurrencia de las especies y predicciones

Los modelos lineales generalizados y modelos aditivos generalizados (GLMs y GAMs por sus siglas en inglés), son dos de las herramientas de modelación estadística más utilizadas para representar la relación que existe entre las capturas de peces pelágicos -como variable de respuesta- y factores espacio-temporales, ambientales y/o características de técnicas de pesca -como variables predictivas- (Marín-Enríquez, 2012, Vögler *et al.*, 2012). En este trabajo se utilizaron los GAMs ya que estos poseen la capacidad de identificar y describir relaciones no lineales entre las variables predictivas y la variable respuesta (Wood, 2006; Guisan *et al.*, 2002).

A pesar de que los GAMs son una técnica de modelaje flexible y poderosa (Hastie y Tibshirani, 1990), estos pueden llegar a sobreajustarse a los datos. Este fenómeno puede reflejarse en una pobre capacidad predictiva del modelo, por lo que su prevención es esencial para la construcción de modelos precisos y robustos. La división aleatoria del conjunto de datos originales en dos subconjuntos ha sido empleada en diferentes estudios para minimizar sesgos potenciales debidos al sobreajuste (Farrell *et al*, 2014; Martínez-Rincón, 2012; Marín-Enríquez *et al*, 2018). El empleo de esta técnica en el presente estudio se vio reflejado en resultados satisfactorios que van entre 0.78-0.88 % de certeza de predicción obtenidos mediante el método del área bajo la curva. Farrell *et al.*, (2014) mencionan que valores mayores a 0.5 % indican que los eventos no suceden de manera aleatoria lo cual nos da la confianza de que los modelos ajustados para cada especie, pueden ser utilizados para realizar predicciones sobre conjuntos de datos diferentes a los utilizados en el proceso de construcción de los modelos.

Son escasos los estudios en los que se emplean técnicas de modelación similares a las utilizadas en este trabajo, enfocados en relacionar las capturas de tiburones con variables ambientales. Martínez-Rincón (2012) utilizó una aproximación similar para distintas especies de pelágicos mayores en el OPO en donde se incluyeron especies como el tiburón *C. falciformis* y *C. longimanus* obteniendo valores de devianza explicada de 4.47 y 7.43% respectivamente. Los modelos ajustados a los datos de la CIPUE de *C. falciformis*, *C. longimanus*, *S. lewini* y *S. zygaena* reportados en la presente tesis, explicaron el 19.1 %, 19.8 %, 20.5 % y el 23.7% de la devianza total respectivamente.

La diferencia en los valores de la devianza explicada puede ser causa de que ambos trabajos se realizaron utilizando fuentes de información distintas; adicionalmente, Martínez-Rincón (2012) tuvo como principal objetivo la comparación del potencial predictivo de dos técnicas de modelación estadística (GAMs y los árboles de regresión impulsados), omitiendo el uso de interacciones, entre otras cosas. Otro estudio en el que se utilizaron técnicas similares para el tiburón *P. glauca* es el de Vögler *et al*, (2012) en donde se utilizaron los GLMs y GAMs, y mediante una distribución poisson estos autores reportaron valores de devianza explicada de ~32-

59%. En contraste con los resultados de esta tesis, el mayor porcentaje de devianza explicada puede deberse principalmente a las diferencias en la escala espacio-temporal utilizada, al uso de fuentes de información y aproximaciones diferentes.

A través de los resultados obtenidos con los GAMs, se pudo hacer una estimación de las características que propician un incremento en la probabilidad de que los tiburones pelágicos analizados en este estudio sean capturados incidentalmente en el OPO con respecto a las variables ambientales, espaciales, temporales y operacionales utilizadas.

Las figuras de efectos parciales sugieren que es más probable encontrar a *C. falciformis* en zonas con TSM mayor a 25°C y menor de 28°C, valores de Chl-a bajos, durante años El Niño, en latitudes cercanas al ecuador entre los 110 y 120°O principalmente. De igual manera, los resultados indican que la probabilidad de capturar al tiburón piloto es mayor cuando se realizan entre 15 y 20 lances sobre objetos flotantes y hacia el final de la serie de tiempo.

Para el caso específico de esta especie la TSM fue la variable que condicionó su presencia en un ~40 % del total de la devianza explicada. Algunos estudios realizados mencionan que las capturas de *C. falciformis* son mayores a medida que los valores de TSM se incrementan (Brenes *et al*, 2000; Minami *et al*, 2007).

Con respecto a las predicciones espaciales de *C. falciformis* el modelo sugiere alta probabilidad de ocurrencia en el OPO durante todo el año. A pesar de ser un tiburón que puede encontrarse en casi toda el área de estudio, el modelo sugiere una zona en particular. Esta zona, considerada en el presente trabajo como hotspot biológico para la especie se presentó activa durante los cuatro trimestres en aguas oceánicas frente a la Península de Baja California entre los 10-25°N y 120-130°O aproximadamente, lo que sugiere que existe una zona oceánica que puede ser de gran importancia para esta especie, ya que es una potencial zona de agregación. Esta zona se caracteriza por ser el punto en el que la divergencia de la corriente Norecuatorial y la contracorriente Norecuatorial (Kessler, 2006), así como la acción de los vientos alisios fertilizan la capa fótica, lo cual tiene como consecuencia un

aumento en la cantidad de alimento disponible para los peces que migran a través de ella (Hall *et al.*, 1999; Reilly, 1990).

Para el caso de *C. longimanus* la longitud fue la variable que condicionó su presencia en un 34% de la devianza total obtenida, lo cual coincide con los hábitos oceánicos de la especie (Bonfil, *et al.* 2008b). Los resultados del modelo sugieren que esta especie prefiere aguas oceánicas con valores de TSM dentro del intervalo de 25-27°C y con concentraciones de Chl-a bajas. El evento de El Niño incrementó la probabilidad de captura de esta especie en el OPO.

Son escasos los trabajos en los que se relacionan las capturas de *C. longimanus* con cuestiones ambientales. A pesar de esto, los resultados obtenidos coinciden con lo mencionado por Bonfil *et al.* (2008b), quienes aseguran que es común capturar a esta especie en aguas oceánicas a temperaturas mayores de 20°C, aunque existen reportes de capturas que van de los 15-28°C. Santana *et al.*, (2013) mencionan que la principal variable ambiental que rige la distribución del tiburón puntas blancas oceánico es la temperatura del mar, pues menciona que esta especie presenta una sensibilidad alta ante los cambios de esta variable. Estos autores mencionan que el evento de El Niño y La Niña son factores que determinan la variabilidad de captura de las capturas de *C. longimanus* en el Pacífico central mexicano.

Las predicciones espaciales sugieren que es más probable encontrar a *C. longimanus* en mar abierto, lo que concuerda con lo registrado para la especie. Las zonas de mayor probabilidad (hotspots) se encontraron en parches distribuidos entre los 100° – 150°O y en las franjas de los 10°N, sobre el Ecuador y en la franja de los 15°S, las cuales se mantuvieron activas durante casi todo el año. Estos parches se encuentran en zonas con características oceanográficas complejas, en donde se incluyen sistemas de afloramiento generados por la migración de la zona intertropical de convergencias y frentes térmicos generados por la divergencia del sistema de corrientes ecuatoriales (Kessler, 2006, Fiedler y Talley, 2006). Debido a que el tiburón puntas blancas oceánico es una especie muy amenazada, de la cual el

conocimiento que se tiene es limitado, se debe prestar atención a estas zonas para futuros estudios que ayuden a su manejo y conservación.

Para *S. lewini*, los resultados del modelo indicaron que existió una probabilidad de ocurrencia mayor en zonas donde la TSM varía entre 24° y 26°C, existe una concentración baja de Chl-a, y en años La Niña. La probabilidad de captura se incrementa a la longitud de los 110°O y en latitudes ligeramente por encima y por debajo del ecuador. El número de lances fue la variable predictiva que influyó más en la probabilidad de captura de la especie de manera directa, con un total de 43% de la devianza explicada. Debido al comportamiento que presenta esta especie, es lógico suponer que a medida que se realizan más lances el número de capturas es mayor, pues se sabe que *S. lewini* llega a formar grupos de más de 100 individuos (Klimley *et al.*, 1998).

Las predicciones espaciales sugieren tres sitios de alta probabilidad de captura de *S. lewini*, las cuales fueron consideradas como hotspots y se mantienen activas durante todo el año. La primera zona se encuentra en la zona sur, frente a las costas de Perú. Esta zona se ve influenciada por el sistema de afloramiento de la costa peruana, generado por la corriente de Humboldt (Flores *et al.*, 2013). El segundo sitio que el modelo predijo fue la costa occidental de la península Baja California, en donde ocurren surgencias costeras durante casi todo el año con una intensificación durante febrero-junio cuando predominan los vientos del noroeste (Norton *et al.* 1985).

La tercera zona fue el golfo de California, en donde a pesar de no obtenerse registros de la especie el modelo lo consideró como hábitat potencial. Este resultado es un buen indicativo de que los modelos (y por tanto, las predicciones) son confiables, pues algunos autores mencionan que el golfo de California es una zona a donde *S. lewini* migra durante el verano con fines reproductivos (Klimley, 1987). Galván-Magaña *et al.* 1989, mencionan que esta especie está presente durante todo el año en la costa sureste del golfo, y que existen agregaciones en la costa suroeste durante el invierno y verano.

Por último, la variable predictiva que influyó más, de manera directa en la probabilidad de captura de *S. zygaena* al igual que con *S. lewini*, fue el número de lances. En este caso, dicha variable explicó el 42% del total de la devianza explicada. El comportamiento reportado para la cornuda prieta sugiere que también llega a formar cardúmenes (Castro, 1983), lo cual explica nuevamente porque el número de lances fue la variable predictiva más importante. El ajuste del modelo sugiere probabilidades de encuentro mayores donde la TSM va de los 23° a los 25°C, en ambientes con concentraciones bajas de Chl-a, en latitudes bajas principalmente y durante años El Niño. En cuanto variables ambientales, la TSM fue la variable que más influyó en la probabilidad de ocurrencia de esta especie. Al respecto, Castro (1983) menciona que el único factor limitante de esta especie es la temperatura del mar.

Las predicciones espaciales del modelo sugieren cuatro zonas con altas probabilidades de abundancia (hotspots). La primera zona se encuentra en aguas oceánicas frente a las costas de la península de Baja California, la segunda zona se encuentra frente a las costas de Perú, ambas mencionadas anteriormente. La tercera zona se encuentra en la parte sureste de las islas Galápagos, influenciada por un complejo sistema de corrientes que forman el frente ecuatorial (Fiedler y Talley, 2006). El cuarto sitio considerado por el modelo fue la boca del golfo de California, el cual es una zona importante de surgencias (Marín-Enríquez *et al.*, 2018).

Las predicciones sugieren zonas de alta probabilidad de ocurrencia de ambos tiburones martillo en zonas similares y algunas zonas en donde no coinciden. Es posible que las predicciones indiquen de manera general, una distribución más oceánica por parte de la cornuda prieta, o que esta especie tiene una preferencia por temperaturas más templadas como se ha mencionado anteriormente (Castro, 1983).

Es de llamar la atención que las predicciones de los modelos coincidan en las áreas de hotspots para diferentes especies. En la parte norte del área de estudio, frente a la península de Baja California se traslapan los hotspots de *C. falciformis*, *C. longimanus* y *S. zygaena*, misma zona que ha sido mencionada con anterioridad como de gran importancia para diferentes especies (Marín-Enríquez *et al.*, 2018, Eslava-Vargas *et al.*, 2013).

Así mismo, en la parte sur del área de estudio se traslapan los hotspots de *S. lewini* y *S. zygaena*. Estos resultados sugieren que se pueden tratar de sitios de agregación de importancia biológica para las comunidades de pelágicos mayores, por lo que se deben de tomar en cuenta para futuros estudios de conservación de los ecosistemas marinos.

X. CONCLUSIONES

- De las cuatro especies analizadas, únicamente las capturas de *C. longimanus* presentaron una tendencia en declive, por lo que se rechazó la hipótesis nula de que la captura incidental de todos los tiburones pelágicos capturados en el OPO con red atunera de cerco está en declive.
- Las diferentes técnicas estadísticas utilizadas demuestran que las variables ambientales (TSM y Chl-a) afectan de manera estadísticamente significativa la distribución de los tiburones estudiados en el OPO, por lo que aceptamos la hipótesis de que la distribución de los tiburones capturados por la flota internacional que pesca atún con red de cerco, se ve afectada por dichas variables ambientales.
- Los modelos estadísticos utilizados en este trabajo tuvieron un buen desempeño (AUC > 0.75), por lo que demostraron ser una herramienta útil para analizar y predecir la probabilidad de ocurrencia de especies oceánicas altamente migratorias.
- La variable ambiental que más influyó en las capturas incidentales de tiburones fue la TSM.
- Se presentó una zona de alta probabilidad de ocurrencia de *C. falciformis* durante todo el año entre los 120° – 135°O y 10° – 25°N.
- Las predicciones de *C. longimanus* indicaron alta probabilidad de ocurrencia de la especie durante todo el año, a lo largo de la franja de los 10°N, a lo largo de la línea del ecuador y sobre los 15°S.
- Se presentaron tres zonas de alta probabilidad de ocurrencia de *S. lewini* durante todo el año en la costa occidental de la península de Baja California, dentro del golfo de California y en las costas de Perú.
- Las predicciones del modelo sugieren cuatro zonas de alta probabilidad de ocurrencia de *S. zygaena*. Las primeras dos se presentaron en la boca del golfo de California y en las islas Galápagos durante el primer y segundo trimestre para

el primer caso, y durante el segundo trimestre en las Galápagos. Las otras dos zonas de importancia biológica predichas por el modelos, se presentaron en la parte oceánica frente a la costa occidental de la península de Baja California y en la costa de Perú; ambas se mantuvieron presentes durante todo el año.

XI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda dar seguimiento a las zonas de alta probabilidad de ocurrencia predichas por el modelo para cada especie analizada en la presente tesis, y realizar estudios acerca de la biología básica de los tiburones para comprender mejor las causas de agregación en estas zonas, y poder llevar a cabo un mejor plan para su conservación.
- Las bases de datos de captura incidental de tiburones capturados en el OPO por la flota atunera internacional, deberían de brindar información acerca de las tallas de los organismos, con la finalidad de generar información más detallada sobre las diferentes especies y detectar posibles segregaciones.
- De igual manera, la flota atunera internacional debería realizar estudios biológicos en el área de operación, con la finalidad de conocer aspectos acerca de su alimentación y reproducción etc, que aporten información valiosa para comprender mejor sus migraciones.

XII. BIBLIOGRAFÍA

- Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, 19(6), 716-723.
- Álava, J. 2009. Viabilidad de las poblaciones de elasmobranquios que están siendo extraídos en la zona de influencia del Parque Nacional Machalilla. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito, Ecuador.
- Ancapichún-Hernández, S. E. 2012. Variabilidad del anticiclón del Pacífico sur y su relación con la oscilación decadal del Pacífico: implicaciones oceanográficas a lo largo de la costa centro-norte de Chile. Tesis de licenciatura. Universidad Austral de Chile. 63 P.
- Anislado-Tolentino, V. 2000. Ecología pesquera del tiburón martillo *Sphyrna lewini* (Griffith y Smith, 1834) en el litoral del estado de Michoacán, México". Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. 145 pp.
- Arenas, P., M. Xall y Miller. 1992. The association of tunas with floating objects and dolphins in the eastern Pacific Ocean. I. Environment and fishing areas. CIAT, La Jolla, California. U.S.A. 55 2.
- Backus, R. H., Springer, S. y Arnold, E. L. J. 1956. A contribution to the natural history of the white-tip shark, *Pterolamiops longimanus* (Poey). *Deep Sea Research*. 3: 178–188.
- Bocanegra-Castillo, N. 2007. Relaciones tróficas de los peces pelágicos asociados a la pesquería del atún en el océano Pacífico oriental. Tesis de doctorado. CICIMAR-IPN, 178 pp.
- Bodiguel, C., D. Greboval, J. Maguire y FAO. 2009. Factors of unsustainability and overexploitation in marine fisheries: views from the southern Mediterranean, West Africa, Southeast Asia and the Caribbean. *FAO*. Roma. 99.
- Bonfil, R., R. Mena y D. de Anda. 1993. Biological Parameters of Commercially Exploited Silky Sharks, *Carcharhinus falciformis*, from the Campeche Bank, Mexico. *NOAA Technical Reports NMFS*. 115: 73-86.

- Bonfil, R., Clarke, S., Nakano, H., Camhi, M. D., Pikitch, E. K. y Babcock, E. A. 2008(a). The biology and ecology of the silky shark, *Carcharhinus falciformis*. *Sharks of the Open Ocean: Biology, Fisheries and Conservation*. 114-127.
- Bonfil, R., Clarke, S., Nakano, H., Camhi, M. D., Pikitch, E. K. y Babcock, E. A. 2008(b). The biology and ecology of the oceanic white-tip shark, *Carcharhinus longimanus*. *Sharks of the Open Ocean: Biology, Fisheries and Conservation*. 128-139.
- 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. *Environmental Biology of Fishes* 19, 161–173.
- Brenes, C.L., Hernández, A. y Campos, J. 2000. Distribución espacial de capturas de tiburón en el Pacífico Nicaragüense y su relación con algunas variables oceanográficas. *Revista de Biología Tropical*. 48 (2/3): 399 – 411.
- Burnham, K. P., y Anderson, D. R. 2002. Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach, 2nd ed. Springer-Verlag.
- Cabrera-Chávez Costa, A. A. 2003. Hábitos alimenticios del tiburón piloto *Carcharhinus falciformis* (Bibron, 1839) en la costa occidental de Baja California Sur. Tesis de doctorado. CICIMAR-IPN. 110 pp.
- Cadena-Cárdenas, L. 2001 Biología reproductiva de *Carcharhinus falciformis* (*Chondrichthyes: Carcharhiniformes: Carcharhinidae*), en el Golfo de California. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California Sur. 66 pp.
- Camhi, M. D., Fordham, S. V. y Fowler, S. L. 2008. Domestic and international management for pelagic sharks. En: Camhi, M. D., Pikitch, E. K., y Babcock, E. A. 2003. *Sharks of the Open Ocean: Biology, Fisheries and Conservation*. Blackwell Publishing.
- Carrera-Fernández, M. 2011. Parámetros reproductivos de los tiburones piloto (*Carcharhinus falciformis*), martillo (*Sphyrna lewini*) y azul (*Prionace glauca*) en el Pacífico mexicano. Tesis de doctorado. CICIMAR-IPN. 100 pp.
- Castro, J. 1983. The Sharks of North American Waters. *Texas A&M University Press*. 180.

- Castro-Aguirre, J.L. 1983. Aspectos zoogeográficos de los elasmobranquios mexicanos. *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas*. IPN. 77-94.
- Chávez F.P., A. Bertrand, R. Guevara-Carrasco, P. Soler y J. Csirke. 2008. The northern Humboldt Current System: Brief history, present status and a view towards the future. En: A. Bertrand, R. Guevara-Carrasco, Soler, P., Csirke, J. y Chávez, F. *Progress in Oceanography*. 79(2 – 4): 95 – 105.
- 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. CICESE. México. 112 pp.
- Cleveland, W. S. 1993. *Visualizing data* (p. 360). Summit, NJ: Hobart Press.
- Comisión Inter-Americana del Atún Tropical. 1989. Mortalidad incidental de Delfines en la Pesquería del Atún en el Océano Pacífico Oriental, 1979-1988. Diez Años del Programa de Técnicos Científicos de la Comisión Interamericana del Atún Tropical. Documento No. 2, Taller Atún-Delfín. San José, Costa Rica. 14-16 de marzo de 1989. 3.
- Comisión Inter-Americana del Atún Tropical. 2010. Reporte anual de la Comisión Inter-Americana del Atún Tropical, 2008. *Inter-American Tropical Tuna Commission*. La Jolla, California. 100 pp.
- Comisión Inter-americana del Atún Tropical. 2012. Información estadística del número de tiburones martillo comunes capturados en viajes de observación de redes de cerco en EPO, buques clase 6. Fecha de preparación de los datos: 15 de junio de 2012.
- Comisión Inter-Americana del Atún Tropical. 2017. Los atunes, peces picudos, y otras especies pelágicas en el océano Pacífico oriental en 2016. México. 133 pp.
- Clarke, T.A. 1971. The ecology of the scalloped hammerhead shark, *Sphyrna lewini*, in Hawaii. *Pacific Science*. 25: 133–144.
- Compagno, L. J. V. 1984. *FAO Species Catalogue. Vol. 4. Sharks of the World: An Annotated and Illustrated Catalogue of Shark Species Known to Date. Parts 1 and 2*. FAO Fisheries Synopsis No. 125. FAO. 655.

- Compagno, L.J.V. 1990. Shark exploitation and conservation. En: Pratt Jr., H.L., S.H. Gruber y T. Taniuchi. pp. 391-415. *Elasmobranch as living resources: Advances in Biology, Ecology, Systematics and the Status of the Fisheries*, NOAA Technical Report NMFS 90.
- Cook, S. 1990. Trends in Shark Fin Markets: 1980, 1990, and Beyond. *Chondros*, 15 Marzo. Pg 3. En: Cortés E. 1999. Standardized diet compositions and trophic levels of sharks. *ICES Journal of Marine Science* 56:707–17.
- Crow, G.; Lowe, C. y Wetherbee, B. 1996. Shark records from longline fishing program in Hawaii with comments on the Pacific Ocean Distribution. *Pac. Sci.* 50: 382 – 392.
- Defenders of Wildlife. 2015. A Petition to List the Oceanic Whitetip Shark (*Carcharhinus longimanus*) as an Endangered, or alternatively as a Threatened, Species Pursuant to the Endangered Species Act and for the Concurrent Designation of Critical Habitat.
- De la Rosa, C. 1995. Middle-American streams and rivers. En: C.E. Cushing, K.W. Cummins y G.W. Marshall. *Ecosystem of the World. 22: River and Stream Ecosystems*. 189–218.
- Eslava Vargas N., Vaca-Rodríguez, J. G. y López, H. 2013. Análisis espacio-temporal de la captura incidental de picudos por la pesquería cerquera venezolana de atún en el Pacífico oriental. *Hidrobiológica* 23 (1): 60-72.
- Farrel, E.R., Boustany, A.M., Halpin, P.N. y Hammon, D.L. 2014. Dolphinfish (*Coryphaena hippurus*) distribution in relation to biophysical ocean conditions in the northwest Atlantic. *Fisheries Research*. 151: 177-190.
- Fiedler, P. C. 1992. Seasonal Climatology and Variability of Eastern Tropical Pacific Surface Waters. NOAA Technical Report NMFS 109. US Department of Commerce. 65.
- Fiedler, P.C. 2002. The annual cycle and biological effects of the Costa Rica Dome. *Deep-Sea Research I* 49: 321–338.
- Fiedler, P. C., y Talley, L. D. 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: a review. *Progress in Oceanography*, 69(2-4), 143-180.

- Flores, R., Espino, M., Luque, G., y Quispe, J. 2013. Patrones de variabilidad ambiental en el mar peruano. *Revista Peruana de Biología*. 20(1): 21-28.
- Friedlander, A. M. y DeMartini, E. E. 2002 Contrasts in density, size, and biomass of reef fishes between the northwestern and the main Hawaiian Islands: The effects of fishing down apex predators. *Marine Ecology Progress Series*. 230: 253–264.
- Friedman, J.H. 2002. Stochastic gradient boosting. *Computational Statistics and Data Analysis*. 38:367–378.
- Galván-Magaña, F., H. J. Nienhuis y Klimley, A. P. 1989. Seasonal abundance and feeding habits of sharks of the lower Gulf of California, Mexico. *California Fish and Game* 75 (2): 74-84.
- Galván-Magaña, F., 1999. Relaciones tróficas interespecíficas de la comunidad de depredadores epipelágicos del Océano Pacífico Oriental. Tesis de doctorado. CICESE, 212 pp.
- García, C. J., R. y Gaxiola, G. 2002. Circulación de la Corriente de California frente a Baja California: 2000 – 2001. Memorias de la Unión Geofísica Mexicana. *Oceanografía*. 251 –252.
- Garrick, J. A. F. 1982. Sharks of the Genus *Carcharhinus*. U.S. Department of Commerce. NOAA Technical Report National Marine Fisheries Service Circular 445. 194.
- Goodyear, C. P. 2003. Spatio-temporal distribution of longline catch per unit effort, sea surface temperature and Atlantic marlin. *Marine and Freshwater Research*. 54:409–417.
- Graco, M. I., Ledesma, J., Flores, G., y Girón, M. 2007. Nutrientes, oxígeno y procesos biogeoquímicos en el sistema de surgencias de la corriente de Humboldt frente a Perú. *Revista peruana de biología*. 14(1): 117-128.
- Guisan, A., Edwards Jr, T. C., y Hastie T. 2002. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological Modelling*. 157:89-100.
- Hall, M., Lennert-Cody, C., García, M. y Arenas, P. 1999. Characteristics of floating objects and their attractiveness for tunas. En: M.D. Scott, W. Bayliff, C.E.

- Lennert-Cody and Shaefer, K.M. Proc. *International Workshop on the Ecology and Fisheries for Tunas Associated with Floating Objects*. 396–446.
- Hastie, T. J. y Tibshirani, R. J. 1990. Generalized additive models, volume 43 of *Monographs on Statistics and Applied Probability*.
- Hearn, A., Ketchum, J., Klimley, A.P., Espinoza, E., y Peñaherrera C. 2010. Hotspots within hotspots? Hammerhead shark movements around Wolf Island, Galapagos Marine Reserve. *Marine Biology*. 157(9):1899-1915.
- Herrera, M., Zarate, P., y Gaibor, N. 2003. Los tiburones en la pesquería del Ecuador. Instituto Nacional de Pesca, Ecuador y Estación Científica Charles Darwin. Unpublished report.
- Hoffmann, J. A. J. 1975. Climatic Atlas of South America. *World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland*.
- Hoyos-Padilla, E. M. 2003. Biología reproductiva del tiburón piloto *Carcharhinus falciformis* (BIBRON, 1839) de Baja California Sur. Tesis de maestría. CICIMAR-IPN. 60.
- Huang, H. W., y Liu, K. M. 2010. Bycatch and discards by Taiwanese large-scale tuna longline fleets in the Indian Ocean. *Fisheries Research*. 106: 261–270.
- Inter-American Tropical Tuna Commission 2009. Vessel capacity class definition related to the requirement for carrying an on-board observer. Agreement on the International Dolphin Conservation Program. La Jolla, California: 21st Meeting of the Parties. 2.
- 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. CICIMAR-IPN. 121 pp.
- Kato, S. 1964. Sharks of the genus *Carcharhinus* associated with the tuna fishery in the Eastern Tropical Pacific Ocean. 22.
- Kessler, W. S. 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*. 69: 181–217.
- Klimley, A. P., y Butler, S.B. 1988. Immigration and emigration of a pelagic fish assemblage to seamounts in the Gulf of California related to water mass

- movements using satellite imagery. *Marine Ecology Progress Series*. 49: 11-20.
- Klimley, A. P. 1987. The determinants of sexual segregation in the scalloped hammerhead shark, *Sphyrna lewini*. *Environmental Biology of Fishes*. 18: 27–40.
- Last, P. R. y Stevens, J. D. 1994. *Sharks and Rays of Australia*. CSIRO, Collingwood, Victoria, Australia.
- Leathwick, J. R., Elith, J., Francis, M. P., Hastie, T., y Taylor, P. 2006. Variation in demersal fish species richness in the oceans surrounding New Zealand: an analysis using boosted regression trees. *Marine Ecology Progress Series*. 321: 267-281.
- Legeckis, R. 1986. A satellite time series of sea surface temperatures in the Eastern Equatorial Pacific Ocean, 1982-1986. *Journal of Geophysical Research*. 91: 12879-12886.
- Lennert-Cody, C., García, M. y Hall, M. 1999. The development of FAD fishery in the Eastern Pacific Ocean: 1992–1998. 22.
- Lezama-Ochoa, N.; Murua, H.; Chust, G.; Van Loon, E.; Ruiz, J.; Hall, M.; Chavance, P.; Delgado-De Molina, A., y Villarino, E. 2016. Present and Future Potential Habitat Distribution of *Carcharhinus falciformis* and *Canthidermis maculata* By-Catch Species in the Tropical Tuna Purse-Seine Fishery under Climate Change. *Frontiers in Marine Science*. 3:34.
- Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, D. B., Lluch-Cota, S.E., 2005. Changes in marine faunal distributions and ENSO events in the California Current. *Fisheries Oceanography* 14, 458–467.
- Camhi M.D., Valenti, S.V., Fordham, S.V., Fowler, S.L. y Gibson, C. 2007. The Conservation Status of Pelagic Sharks and Rays, Report of the IUCN Shark Specialist Group: Pelagic Shark Red List Workshop. *IUCN Species Survival Commission Shark Specialist Group*. 78 pp.
- Maguire, J. J., Sissenwine, M., Csrke, J., Grainger, R., y Garcia, S. 2006. The state of world highly migratory, straddling and other high seas fishery resources and associated species. (No. 495). FAO.

- Marín-Enríquez, E. 2012. Variabilidad de las tasas de captura de marlín azul *Makaira nigricans* (Lacepède, 1802) en la entrada del Golfo de California, y su relación con algunas variables oceanográficas. Tesis de maestría. CICIMAR IPN. 67 pp.
- Marín-Enríquez, E., y Muhlia-Melo, A. 2018. Incidental catch of the rare shortbill spearfish (*Tetrapturus angustirostris*) by the tuna purse seine fleet in the eastern tropical Pacific Ocean. *Ciencias Marinas*, 44(1), 21-32.
- Marín-Enríquez, E., Seoane, J., y Muhlia-Melo, A. 2018. Environmental modeling of occurrence of dolphinfish (*Coryphaena spp.*) in the Pacific Ocean off Mexico reveals seasonality in abundance, hot spots and migration patterns. *Fisheries Oceanography*, 27(1): 28-40.
- 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. CICIMAR-IPN. 100 pp.
- Martínez-Rincón, R. O., Ortega-García, S., y Vaca-Rodríguez, J. G. 2012. Comparative performance of generalized additive models and boosted regression trees for statistical modeling of incidental catch of wahoo (*Acanthocybium solandri*) in the Mexican purse-seine tuna fishery. *Ecological Modelling*. 233: 20–25.
- Martínez-Rincón, R.O. 2005. Distribución espacio-temporal de la captura por unidad de esfuerzo del pez vela (*Istiophorus platypterus*) en el Golfo de Tehuantepec y su relación con la temperatura superficial del mar y la concentración de pigmentos fotosintéticos. Tesis de Licenciatura. UNICACH. 77 pp.
- Martínez-Rincón, R.O. 2008. Análisis de la captura incidental de dorado (*Coryphaena sp*) registrada por la flota atunera mexicana en el pacífico oriental. Tesis de maestría. CICIMAR-IPN. 97 pp.
- McCann, C. 1964. A coincidental distributional pattern of some of the larger marine animals. *Tuatara* 12 (2):119-124.
- Minami, M., Lennert-Cody, C.E., Gao, W. y Román-Verdesoto, M. 2007. Modeling shark bycatch: The zero-inflated negative binomial regression model with smoothing. *Fisheries Research*. 84: 210–221.

- Miyabe, N. y Bayliff, W.H. 1987. Un examen de la pesca palangrera japonesa de atunes y peces espada en el Océano Pacífico oriental, 1971-1980. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin* 19 (1):123-159.
- Molina-Cruz, A. 1984. Evolución oceanográfica de la boca del gofo de California. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, UNAM. Vol. 13, No. 2, 95-120.
- Müller-Karger, F. E. y Fuentes-Yaco, C. 2000. Characteristics of wind-generated rings in the Eastern Tropical Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research* 105:1271-1284.
- Myers, R. A., Baum, J.K, Shepherd, T. D., Powers, S. P., and Peterson, C. H. 2007. Cascading effects of the loss of apex predatory sharks from a coastal ocean. *Science*. 315: 1846-1850.
- Nakano, H. 1996. Distribution of pelagic elasmobranchs in the North Pacific Ocean. *Kaiyo Monthly* 28(7), 407–415.
- Nikolsky, G.V., 1963. The Ecology of fishes. *Academic Press*. 352.
- Norton, J., McLain, D., Brainard, R., y Husby, D. 1985. The 1982-1983 El Niño event off Baja and Alta California and its ocean climate context. En: “El Niño North. El Niño effects in the eastern subtropical Pacific Ocean” eds. W.S Wooster and D. L. Fluharty. Washington Sea Grant Program. 44-71.
- Ortega-García, S., S. Lluch-Cota. 1996. Distribución de la abundancia de atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) y su relación con la concentración de pigmentos fotosintéticos medidos por satélite en aguas al sur de México. *Inv. Geogr.* 4: 85-93.
- Oshitani, S., Nakano, H. y Tanaka, S. 2003. Age and growth of the silky shark *Carcharhinus falciformis* from the Pacific Ocean. *Fisheries Sciences*. 69 (3): 456-464.
- Polovina, J. J., Abecassis, M., Howell, E. A., y Woodworth, P. 2009. Increases in the relative abundance of mid-trophic level fishes concurrent with declines in apex predators in the subtropical North Pacific, 1996–2006. *Fishery Bulletin*. 107(4): 523-531.

- Reilly, S. B. 1990. Seasonal changes in distribution and habitat differences among dolphins in the eastern tropical Pacific. *Marine Ecology Progress Series*. 66:1-11.
- Romanov, E. V. 2002. Bycatch in the tuna purse-seine fisheries of the western Indian Ocean. *Fishery Bulletin*. 100(1): 90-105.
- Román-Verdesoto, M., y Orozco-Zöller, M. 2005 Bycatches of Sharks in the Tuna Purse-Seine. *Fishery of the Eastern Pacific Ocean Reported by Observers of the Inter-American Tropical Tuna Commission, 1993–2004*. Data Report 11. IATTC, La Jolla, CA.
- Sánchez-de Ita, J.A., Quiñónez-Velázquez, C., Galván-Magaña, F., Bocanegra-Castillo, N., y Félix-Uraga F. 2011. Age and growth of the silky shark *Carcharhinus falciformis* from the west coast of Baja California Sur, México. *Journal of Applied Ichthyology*. 27: 20-24.
- Santana-Hernández, H.; Espino-Bar, E. y Valdez-Flores. J. J. 2013. Distribución y abundancia relativa del tiburón oceánico de aletas blancas *Carcharhinus longimanus*, capturado por barcos palangreros en el Pacífico central mexicano. *Ciencia pesquera*. 21 (1): 27-39.
- Sartimbul, A., Nakata, H., Rohadi, E., Yusuf, B., y Kadarisman, H. P. 2010. Variations in chlorophyll-a concentration and the impact on *Sardinella lemuru* catches in Bali Strait, Indonesia. *Progress in Oceanography*. 87: 168–174.
- Sloyan, B. M., Johnson, G.C., y Kessler, W. S. 2003. The Pacific cold tongue: a pathway for interhemispheric exchange. *Journal of Physical Oceanography*. 33: 1027–1043.
- Solana-Sansores, R. 2001(a). Patrones espaciales de las especies epipelágicas capturadas incidentalmente en la pesca del atún sobre objetos flotantes, en el océano pacífico oriental. *Ciencias Marinas*. 27: 445–479.
- Solana-Sansores, R. 2001(b). Los objetos flotantes del pacífico oriental: Formas, distribución espacial y cambios temporales. *Ciencias Marinas*. 27: 423–443.
- Soriano-Velasquez, S.R., Castillo-Geniz, J.L., Acal-Sánchez, D., Santana-Hernández, H., Tovar-Ávila, J., Ramirez-Santiago, C., González-Ania, L., Liedo-Galindo, A., y Corro- Espinosa D. 2011. Dictamen Técnico para Considerar Zonas

- Específicas para la Aplicación de vedas de tiburón y rayas en el Pacífico Mexicano. Instituto Nacional de la Pesca. SAGARPA.
- Strasburg, D. W. 1958 Distribution, abundance, and habits of pelagic sharks in the central Pacific Ocean. *Fishery Bulletin* 58, 335–361.
- Su, N. J., Su, C. L., Punt, A. E., y Yeh, S.Z. 2008. Environmental and spatial effects on the distribution of blue marlin (*Makaira nigricans*) as inferred from data for longline fisheries in the Pacific Ocean. *Fish Oceanogr.* 17: 6, 432 - 445.
- Thomas, W. H. 1977. Nutrient-phytoplankton interrelationships in the eastern tropical Pacific Ocean. *Bulletin Inter-American Tropical Tuna Commission.* 17(3): 172-212.
- Torres-Huerta, A. M., Villavicencio-Garayzar, C. J. y Corro- Espinoza D. 2009. Biología reproductiva de la cornuda común *Sphyrna lewini* (Griffiths y Smith) (Sphyrnidae) en el Golfo de California. *Hydrobiologica.* 18(3): 227-237.
- Torres-Orozco, E. 1993. Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de maestría. Centro de investigación científica y de educación superior de Ensenada. División de Oceanología. Departamento de oceanografía física. 92 pp.
- Trasviña, A., Barton, E.D., Vélez, H.S. y Brown, J. 2003. Frontal subduction of a cool surface water mass in the gulf of Tehuantepec, Mexico. *Geofísica Internacional.* (42): 101-114.
- Vögler, R., Beier, E., Ortega-García, S., Santana-Hernández, H. y Valdez-Flores, J. J. 2012. Ecological patterns, distribution and population structure of *Prionace glauca* (Chondrichthyes: Carcharhinidae) in the tropical-subtropical transition zone of the north-eastern Pacific. *Marine Environmental Research.* 73: 37–52.
- Wang, C. y Fiedler, P.C., 2006. ENSO variability in the eastern tropical Pacific: a review. *Progress in Oceanography.* 69(2–4): 239–266.
- Watson, J. T., Essington, T. E., Lennert-Cody, C. E. y Hall, M. A. 2009. Trade-Offs in the Design of Fishery Closures: Management of Silky Shark Bycatch in the Eastern Pacific Ocean Tuna Fishery. *Conservation Biology.* 23:626–635.

- Whittingham, M. J., Stephens, P. A., Bradbury, R. B., y Freckleton, R. P. 2006. Why do we still use stepwise modelling in ecology and behaviour?. *Journal of Animal Ecology*. 75:1182–1189.
- Wood, S. N. 2006. Generalized Additive Models: an Introduction with R. Chapman & Hall: London.
- Wyrtyki, K. 1966. Oceanography of the eastern tropical Pacific Ocean. *Bulletin Inter-American Tropical Tuna Commission*. 5: 269-304.
- Wyrtyki, K. 1981. An estimate of equatorial upwelling in the Pacific. *Journal of Physical Oceanography*. 11:1205–1214.
- Wyrtyki, K. 1965. Surface currents of the eastern tropical pacific ocean. *Bulletin Inter-American Tropical Tuna Commission*. 9 (5): 269 – 304.
- Zar, J.H. 2010. Biostatistical analysis. 5ª Ed. Prentice Hall. New Jersey. 663.
- Zarate-Rustrián, J. 2010. Edad y crecimiento del tiburón martillo *Sphyrna lewini* (Griffth & Smith, 1834), en la costa sur de Oaxaca, México. Tesis de maestría. CICIMAR-IPN. 59 pp.
- Zárate-Villafranco, A. 1998. Estudio de la asociación de los objetos flotantes naturales y/o artificiales (FADS) con la captura del atún. Tesis de maestría. CICIMAR-IPN. 114 pp.
- Zuta, S., y Guillén, O. 1965. Condiciones oceanográficas en el Pacífico Peruano durante el año 1964. Instituto del Mar del Perú (Manuscrito no publicado).