

**IMPACTO DE LA VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LA
DISTRIBUCIÓN DE *Sphyrna lewini* EN EL CORREDOR MARINO DEL
PACÍFICO ESTE TROPICAL**



**TRABAJO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR
EL TÍTULO DE BIÓLOGO**

AURA MARIA RODRÍGUEZ BURGOS

DIRECTOR:

PhD FRANCISCO JAVIER BRICEÑO ZULUAGA

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
PROGRAMA DE BIOLOGIA APLICADA**

CAJICÁ, CUNDINAMARCA

2021-1

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	4
1. CAPÍTULO I: ARTÍCULO DE REVISIÓN	5
1.1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.2. METODOLOGÍA	6
1.3. Océano Pacífico Oriental y su interacción con las especies marinas	6
1.3.1. Ecología de <i>Sphyrna lewini</i> y su interacción con el Océano Pacífico	7
1.3.2. Preferencia alimenticia de <i>Sphyrna lewini</i>	7
1.3.3. Preferencia de hábitat de <i>Sphyrna lewini</i>	8
1.4. Dinámica oceanográfica regional en el Pacífico Sur	11
1.5. Dinámica atmosférica regional del Pacífico sur	14
1.6. Dinámica de las migraciones del tiburón martillo durante ENSO en el CMAR.....	15
1.6.1. Migraciones de <i>Sphyrna lewini</i> en el CMAR.....	17
1.6.2. Migraciones de <i>Sphyrna lewini</i> y zonas de pesca	19
1.6.3. Reproducción de <i>Sphyrna lewini</i> y su relación con ENSO en el CMAR	19
1.7. Variabilidad climática y biodiversidad del Pacífico sur	20
1.8. CONCLUSIONES.....	21
1.9. BIBLIOGRAFÍA	22
1.10 ANEXOS	29
2. CAPÍTULO II: ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN.....	32
2.1 RESUMEN.....	32
3. INTRODUCCIÓN.....	32
4. METODOLOGÍA	35
4.1 Área de estudio	35
4.2 Obtención de registros y predictores climáticos.....	35
4.3 Modelado de nicho ecológico.....	36
4.4 Tratamiento de ocurrencias	37
4.5 Tratamiento de información ambiental	37
4.6 Calibración del modelo	38
4.7 Evaluación y selección del modelo final	38
4.8 Análisis de extrapolación	39
5. RESULTADOS.....	39

6. DISCUSIÓN	41
6.1 Curvas de respuesta	41
6.2 Mapas de idoneidad ambiental	44
7. RECOMENDACIONES	45
8. CONCLUSIONES	46
9. BIBLIOGRAFÍA	47
10. ANEXOS	53

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primera instancia a mi director Francisco Javier Zuluaga Briceño y a mi orientador externo Julián Leonardo Ávila Jiménez, quien fue un integrante clave que nos apoyó fuertemente en el proceso de modelación y en la construcción del segundo capítulo de este trabajo. Aprendí una nueva herramienta con un gran potencial para la realización de modelos y sobre todo a dominar el Software R. En conjunto mi director y orientador me guiaron en este proceso de aprendizaje, les agradezco su paciencia, constancia y entrega que fueron clave para poder culminar con este trabajo.

En segunda instancia agradezco a la Universidad Militar Nueva Granada y al programa de Biología Aplicada por hacerle seguimiento al trabajo y por la retroalimentación obtenida a lo largo del desarrollo de este trabajo. Por último, pero no menos importante a mi mamá que me dio la oportunidad de realizar mis estudios profesionales en esta universidad y que siempre me apoyo a culminar mi carrera y obtener mi título profesional de bióloga.

1. CAPÍTULO I: ARTÍCULO DE REVISIÓN

INTERACCIÓN OCÉANO-ATMÓSFERA Y ECOLOGÍA DEL TIBURÓN MARTILLO (*Sphyrna lewini*) EN EL OCÉANO PACÍFICO

1.1. INTRODUCCIÓN

El Océano Pacífico es el océano de mayor extensión con características únicas que lo diferencia de los demás océanos. Sus aguas presentan una salinidad alta, con temperaturas que oscilan de entre 0 a 30°C, además, se caracteriza por tener una alta productividad primaria principalmente en el Pacífico oriental sur (López-Victoria et al., 2004). Cuenta con una gran variedad de ecosistemas marinos como arrecifes de coral, mangles y estuarios, que permiten albergar una gran variedad de especies marinas (Evans et al., 2016). A su vez, determinan condiciones únicas como una mayor disponibilidad de alimento gracias a las surgencias y temperaturas óptimas que convierten a este océano en uno de los más productivos del mundo, caracterizado por su recurso pesquero (Chávez et al., 2008; Oyarzun et al., 2019).

Algunos de estos atributos se deben a la dinámica entre el océano y la atmósfera que es modulada por mecanismos y modos climáticos como el fenómeno de El Niño y La Niña (Camino, 2018). Condiciones que a su vez regulan el inicio y final de migraciones de algunas especies marinas (Bessudo et al., 2011; Ketchum et al., 2014b). Sin embargo, existe una reciente preocupación por los efectos del cambio climático que pueden llegar a alterar estos fenómenos naturales y las posibles implicaciones que traerá consigo para la biodiversidad de la zona y para las personas que dependen del recurso pesquero (Chávez et al., 2003; Aravena et al., 2014; Oyarzún & Brierley, 2019).

Adicionalmente, hay especies migratorias que recorren este océano visitando áreas costeras o islas oceánicas, zonas que se cree utilizan como refugio y descanso (Zanella et al., 2016), en especial especies que recorren grandes distancias para reproducirse o para buscar alimento (Chávez et al., 2020). Una de esas especies es el tiburón martillo (*Sphyrna lewini*), un elasmobranquio que tiene una distribución global, que se concentra en las zonas tropicales y subtropicales, como Colombia (Zanella et al., 2016; Estupiñán-Montaño et al., 2017). Actualmente, esta especie es considerada en estado crítico según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturales (UICN) y se cree que la causa de la disminución de su población se debe a varios factores, entre estos la pesca, la cual se considera como su principal amenaza (Bessudo et al., 2011b). Asimismo, cambios en el ecosistema en el que habita y la disminución de las presas que suele consumir, son factores que pueden amenazar su supervivencia; además del cambio climático (Flores-Martínez et al., 2017). Este último puede tener graves implicaciones en la fisiología y comportamiento del tiburón, debido a los cambios que puede generar en el ecosistema en el que habita, es decir, cambios en la temperatura, oxígeno o pH. Parámetros que se ha demostrado se relacionan fuertemente con los conductos y

cambios en estas condiciones pueden alterar su ecología (Hoffmayer et al., 2013; Ketchum et al., 2014a; Rivas et al., 2018).

Este tiburón tiene un hábito pelágico-costero, porque es usual encontrarlo cerca de montes marinos o islas oceánicas como las islas del Pacífico Oriental Este (ETP) (Bessudo et al., 2011a; Ketchum et al., 2014a). Este comportamiento se ha estudiado en los últimos años y resulta ser un aspecto que determina sus ciclos reproductivos (Salinas de León et al., 2017). En este sentido, las hembras se concentran en áreas costeras para crear zonas de crianzas, mientras que los machos tienen hábitos más pelágicos (Aguilar Castro, 2003; Zanella & López-Garro, 2015). De igual forma, las hembras buscan zonas productivas para dar a luz a sus crías. Por lo que en muchos casos es habitual ver crías de *S.lewini* cerca de manglares, desembocaduras de ríos (Estupiñán-Montaño et al., 2009) y más durante el fenómeno de La Niña, asociada a un aumento de la productividad primaria gracias a procesos de surgencias (Bessudo et al., 2011a; Dembicki, 2016).

Esta revisión describe las principales características oceanográficas y atmosféricas que modulan la climatología del océano Pacífico oriental sur. Asimismo, establece como estos parámetros climáticos influyen sobre la biodiversidad marina y como la variabilidad climática podría alterar el equilibrio ecosistémico de la zona. Por otro lado, se discutirá acerca de la ecología del tiburón martillo y como la climatología y oceanografía asociada al Océano Pacífico se convierte en un factor principal que modula sus ciclos migratorios y reproductivos.

1.2. METODOLOGÍA

Se realizó una revisión de artículos relacionados con el estudio de las características climatológicas del Pacífico oriental sur y la ecología del tiburón martillo *S.lewini*. La información se obtuvo bajo un criterio de búsqueda de artículos publicados en la última década (2013 al 2018) relacionados con la biodiversidad, ecología, oceanografía y climatología de la zona. Asimismo, se realizó un análisis bibliométrico de los artículos seleccionados, (Figura 1, ver anexos) destacando grupos y autores que más han publicado sobre esta temática, resaltando autores como Felipe Galvan-Magana, James Ketchum y Peter Klimley quienes son los que han realizado una mayor publicación en temas asociados con la ecología de tiburones (Figura 2, ver anexos).

1.3. OCÉANO PACÍFICO ORIENTAL Y SU INTERACCIÓN CON LAS ESPECIES MARINAS

El Océano Pacífico es el más grande en el mundo ocupando 32% de la superficie terrestre total, cerca de 167,7 millones de km² (Reyna Moreno et al., 2013). Se extiende de norte a sur desde el Ártico a la Antártida, limitando al oriente con la costa de Norte, central y sur de América, y al occidente con Japón, Australia y Nueva Zelanda (Balasubramanian, 2014). Se caracteriza por ser el océano más profundo del mundo, debido a que allí se encuentra la fosa de las Marianas, con una profundidad de 11.034m (Reyna Moreno et al., 2013; Rodríguez-Ponga, 2014). Por otro lado, también es considerado como el área con mayor actividad sísmica, gracias a el Anillo de Fuego del Pacífico, una zona que

posee cerca del 90% de los volcanes activos, lo que determina un constante movimiento de las placas tectónicas en esta zona (Rodríguez-Ponga, 2014). En volumen este océano representa cerca de 622 millones de km³ con temperaturas que van desde los 0 °C en los polos, a los 30°C en la zona ecuatorial (Balasubramanian, 2014). A comparación del Caribe, sus aguas son más frías, el oleaje y las mareas son más altas de 4 a 5 m de alto, con valores de salinidad alta (superior a 34.5 PSU) y una gran productividad de fitoplancton (López-Victoria et al., 2004; Jerez-Guerrero, et al., 2017). Finalmente, los ecosistemas que predominan este océano son los manglares, estuarios y arrecifes de coral, siendo la Barrera de coral de Australia su mayor exponente (Evans et al., 2016).

1.3.1. Ecología de *Sphyrna lewini* y su interacción con el Océano Pacífico

El tiburón martillo común (*Sphyrna lewini*) es una especie de condrictio perteneciente a la familia Sphyrnidae, caracterizada por vivir en habientes pelágicos y costeros que incluyen ecosistemas de arrecife, manglar y estuarios (Gallagher & Klimley, 2018). Es una especie vivípara con un ciclo reproductivo anual o bianual, sus periodos de gestación duran de 8 a 12 meses y tienen entre 12 y 41 crías (Clarke *et al.*, 2015, Gallagher & Klimley, 2018). Su madurez es alcanzada a los 13 años y su vida máxima es de 35 años (Drew *et al.*, 2015). Los tiburones martillo se componen de tres especies: el tiburón martillo gigante (*Sphyrna mokarran*), el tiburón festoneado (*Sphyrna lewini*), y el tiburón martillo liso (*Sphyrna zygaena*). Al observar la morfología de *S. lewini*, se identifica que además de tener una cabeza en forma de T bien distintiva, se diferencia de las demás especies por tener una muesca en el centro de su cabeza que forma dos surcos de cada lado (Figura 3) (Gallagher & Klimley, 2018).

1.3.2. Preferencia alimenticia de *Sphyrna lewini*

Existe una gran diferencia entre la dieta alimenticia de los juveniles y adultos de *Sphyrna lewini*. Los tiburones juveniles tienden a alimentarse de especies bentónicas y neríticas, mientras que los adultos de especies neríticas y epipelágicas (Estupiñán-Montaño et al., 2009). Entre los representantes de su menú se encuentran langostas, cangrejos, camarones, peces y cefalópodos. Siendo estos dos últimos de su dieta principal donde se destaca *Pomadasys panamensis*, *Chloroscombrus orqueta* y *Loliolopsis diomedae* respectivamente, aunque se considera una especie generalista (Flores-Martínez *et al.*, 2017).

Se ha determinado que existe una segregación de sexos para las crías de tiburón martillo al momento de alimentarse en las zonas de crianza. Los machos juveniles prefieren zonas someras donde se alimentan de peces como caballas (*Scomber japonicus*), sardinas (*Sardinops caeruleus*) (Estupiñán-Montaño et al., 2009) y algunos cefalópodos, en general especies neríticas (Flores-Martínez et al., 2017). Por otro lado, según Flores-Martínez et al., (2017), las hembras juveniles prefieren zonas más profundas donde consumen cefalópodos principalmente el calamar gigante (*Dosidicus gigas*) y el calamar loliginido (*Loliolopsis diomedae*), especies de profundidad. Una vez llegan a la adultez las hembras pasan mayor tiempo cerca a las

costas en las zonas de crianza, por lo tanto, su alimentación se basa en especies como *Auxis rochei*, *Euthynnus lineatus* (Flores-Martínez et al., 2017). Por otra parte, los machos al habitar zonas oceánicas se alimentan principalmente de especies como el calamar gigante que se sabe realiza migraciones verticales y probablemente los tiburones martillos van tras él en las noches (Aguilar Castro, 2003).

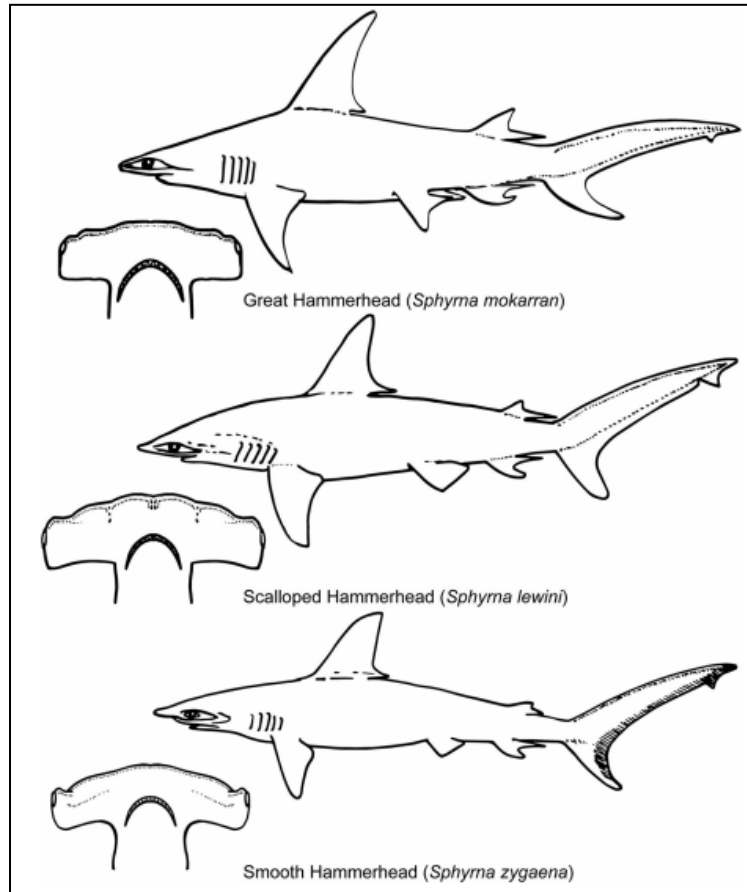


Figura 3. Imagen comparativa de cabeza y torso de las tres especies de tiburón martillo (Gallagher & Klimley, 2018).

1.3.3. Preferencia de hábitat de *Sphyrna lewini*

Se sabe que existen muchos organismos que cambian el hábitat en el que viven según las etapas de desarrollo desde que son juveniles hasta adultos. Esto se conoce como cambios ontogénicos, las modificaciones en la preferencia de hábitat o movimientos verticales y horizontales que tiene por ejemplo algunos tiburones (Hoyos-Padilla et al., 2014). Las crías de *S.lewini* crecen y se desarrollan cerca las costas, en zonas altamente productivas como los manglares o cerca a desembocadura de ríos (Estupiñán-Montaña et al., 2009). Es decir, habitan principalmente zonas costeras y someras en los primeros años de vida, entre los 3 y 7 años (Coiraton & Amezcua, 2020). Cuando llegan a su etapa juvenil o adulta, cambian su hábito y empiezan sus migraciones dirigiéndose a zonas pelágicas (Zanella & López-Garro, 2015).

Por otro lado, los adultos tienen otros comportamientos, los machos habitan zonas profundas lejos de las costas ya sea que tengan un hábito solitario o formando pequeños grupos (Estupiñán-Montaño et al., 2009). Mientras, las hembras se agregan y en conjunto forman las “Schools” en zonas costeras (Zanella & López-Garro, 2015), aunque esto solo ocurre en las temporadas de reproducción cuando dan a luz, probablemente una vez al año (Salinas de León et al., 2017). Es usual ver adultos de *S.lewini* en agregaciones, es decir, hembras y machos cerca de motes marinos o islas oceánicas, donde se cree toman estas áreas como zonas de refugio y descanso (Zanella et al., 2016; Coiraton & Amezcua, 2020).

Estos tiburones tienen una distribución global, presentando una alta preferencia por las zonas tropicales y subtropicales (Zanella et al., 2016). En el Océano Pacífico oriental se distribuye desde el sur de California hasta Perú (Estupiñán-Montaño et al., 2017), siendo un hotspot de esta especie el Corredor Marino del Este Tropical (CMAR). Esta es una zona caracterizada por albergar una gran biodiversidad marina, formada por Malpelo y Gorgona (Colombia), Isla Cocos (Costa Rica), Isla Galápagos (Ecuador) e isla Coiba (Panamá) (Puentes & Moncaleano, 2012).



Figura 4. Mapa geográfico de las islas y países que conforman el Corredor Marino del Pacífico Este Tropical (CMAR) (Puentes & Moncaleano, 2012).

Como ya fue mencionado, *S.lewini* es una especie que se caracteriza por habitar zonas oceánicas y costeras, donde se sabe forman “schools” o zonas de crianza (Estupiñán-Montaño et al., 2017). Estas áreas suelen ser de poca profundidad, temperaturas templadas y cercanas a las costas que presentan abundancia de alimento y un menor riesgo de depredación para las crías (Zanella et al., 2016). Por tal motivo, es habitual ver ejemplares de esta especie en estas áreas por mayor tiempo y en gran densidad (Heupel et al., 2007; Hernández Rodríguez, 2017). Algunas de las áreas de crianza hacen parte de las áreas marinas protegidas (AMP) como las de Malpelo (Colombia), Isla Cocos (Costa Rica) e isla Galápagos (Ecuador) (Bessudo et al., 2011a; Zanella et al., 2016). Sin embargo, otras áreas de crianza pueden quedar por fuera de las AMP lo que pone en riesgo la supervivencia de las crías al ser atrapadas por redes de pesca (Zanella, I., & López-Garro, 2015).

Las AMP constituyen sitios con una alta tasa de biodiversidad o “hotspot” que se presentan principalmente en islas oceánicas. Las características oceanográficas y topográficas de estas zonas favorecen la productividad primaria y la disponibilidad de alimento (Roberts et al., 2017). De este modo forman sitios claves para que muchos organismos pelágicos y migratorios se alimenten, se reproduzcan y se refugien (Chávez et al., 2020). Según Hearn et al., (2010b) las características de estos lugares y su importancia ecológica convierten estas AMP en corredores biológicos. Por lo tanto, su conservación permitir proteger una gran diversidad marina que incluye especies clave y especies en peligro de extinción como lo son las ballenas, tortugas y tiburones como *S.lewini* (Nalesso et al., 2019). Para Hearn et al., (2010b) la creación de estas reservas y el aumento en área de su extensión permite limitar las pesquerías comerciales que se llevan a cabo en estas áreas y que constituyen la mayor amenaza de la biodiversidad marina.

Sin embargo, el estado de conservación actual del tiburón martillo se encuentra en estado crítico de extinción según la Unión para la Conservación de la Naturaleza (IUCN). Se piensa que la pesca es responsable de que su población haya disminuido en un 90% en los últimos años (Hoyos-Padilla et al., 2014). No obstante, Duffy et al., (2015) considera que aún no es claro si el decrecimiento de la población se debe a la pesca, a cambios en el ecosistema en el que habita o a la disponibilidad de alimento. Al ser una especie que ocupa los últimos lugares en la red trófica, su rol ecológico es clave al permitir controlar las poblaciones de sus presas y asegurar un equilibrio en el ecosistema (Flores-Martínez et al., 2017). A pesar de la creación de AMP, aún se presentan algunas presiones sobre zonas que ponen en riesgo la biodiversidad marina. Es habitual encontrar flotas pesqueras industriales o técnicas de pesca artesanales por parte de las poblaciones aledañas que con o sin intención resultan atrapando especies indicadoras del ecosistema como tiburones (*Sphyrna lewini*, *Carcharhinus*

galapagensis, *Carcharhinus falciformis*), rayas (*Aetobatus narinari*) y jureles (*Seriola rivoliana*, *Caranx melanpygus*) (Soler et al., 2013).

Los tiburones desempeñan un rol ecológico de gran importancia. Al encabezar la cadena trófica permiten modular la estructura, función y salud de ecosistemas marinos como los arrecifes (Baum & Worm, 2009). No obstante, al ser organismos ectotermos, tienen una capacidad de aclimatación limitada (Tewksbury et al., 2008). Rosa et al., (2014), consideran que los tiburones se ven directamente afectados por la variabilidad climática en el océano. Su principal argumento se basa en la baja adaptabilidad que tienen al presentar una pérdida de fecundidad a medida que llegan a la madurez (Field et al., 2009).

Diferentes estudios han podido demostrar la relación existente entre la temperatura y *S.lewini*. Estos estudios evidencian que el aumento de esta variable favorece el crecimiento de crías de este tiburón en temporada de verano (Ribot-Carballal et al., 2005; Coiraton et al., 2019). Mientras que Pistevos et al., (2015), considera que la elevación de la temperatura junto con la acidificación traerá consigo una disminución en la capacidad de detectar alimento por parte de los tiburones. Sin embargo, pese a la información existente que se relaciona con cambios en la fisiología de *S.lewini*, aún se desconoce acerca del impacto del cambio y/o la variabilidad climática sobre la distribución del tiburón (Rosa et al., 2014).

1.4. Dinámica oceanográfica regional en el Pacífico Sur

El océano Pacífico oriental está regido por diferentes variables oceanográficas en las que se destaca las corrientes, la termoclina y las surgencias. Su interacción hace de este océano uno de los más productivos del mundo. De esta manera, es importante comprender esta dinámica y su implicación en la ecología y biodiversidad de la zona. Las corrientes oceánicas que se definen como el movimiento del agua en todo el mundo que son impulsadas por la velocidad del viento, el efecto Coriolis y la temperatura (Hays, 2017; Bressan & Constantin, 2019). El movimiento puede ser vertical, lo que da origen a fenómenos como las surgencias (upwellings), o puede ser horizontal dando origen a las corrientes (Wunsch, 2002). En el océano Pacífico sur, las corrientes se forman debido a la dinámica de los vientos alisios, los movimientos anticiclónicos y la termohalina (Balasubramanian, 2014). De esta manera, originan un sistema de corrientes de gran importancia conformado por la Corriente Ecuatorial del Pacífico Sur, quien se mueve de oeste a este y se une con la Corriente Australiana. Luego baja y se cruza con la Corriente del Pacífico Sur que se mueve de este a oeste, hasta unirse a la corriente del Perú o corriente de Humboldt. Allí llega nuevamente a la Corriente Ecuatorial del Pacífico Sur y completa el giro. A diferencia del sistema de corrientes del Pacífico Norte, el giro ocurre en el sentido contrario a las manecillas del reloj (Figura 5) (Ramírez, 2006).

Dentro de este gran sistema la zona del Pacífico sur donde se encuentra la Corriente de Humboldt (HCS), está se caracteriza por aportar cerca del 15 al 20% de la productividad pesquera en todo el mundo (Sherman & Hempel, 2008; Oyarzun et al., 2019). Con temperaturas que varían desde los 16 a los 25°C, es considerada como una de las zonas

más productivas gracias a los procesos de surgencias que allí se llevan a cabo (Chávez et al., 2008).

El océano tropical está formado por tres capas: la superficial, que suele estar relacionada con aguas cálidas; la profunda, donde el agua es fría y la transición entre una y la otra que se denomina termoclina (Maturana et al., 1997). Esta última es permanente en las zonas tropicales, pero a medida que se extiende a los polos va desapareciendo. Su extensión vertical y su zonificación estable evita que las aguas cálidas y frías se mezclen (Iglesias, 2010). En el Pacífico oeste, la termoclina se ubica a 200 m de profundidad, mientras que en el Pacífico este se ubica a 50 m de profundidad (Maturana et al., 1997).

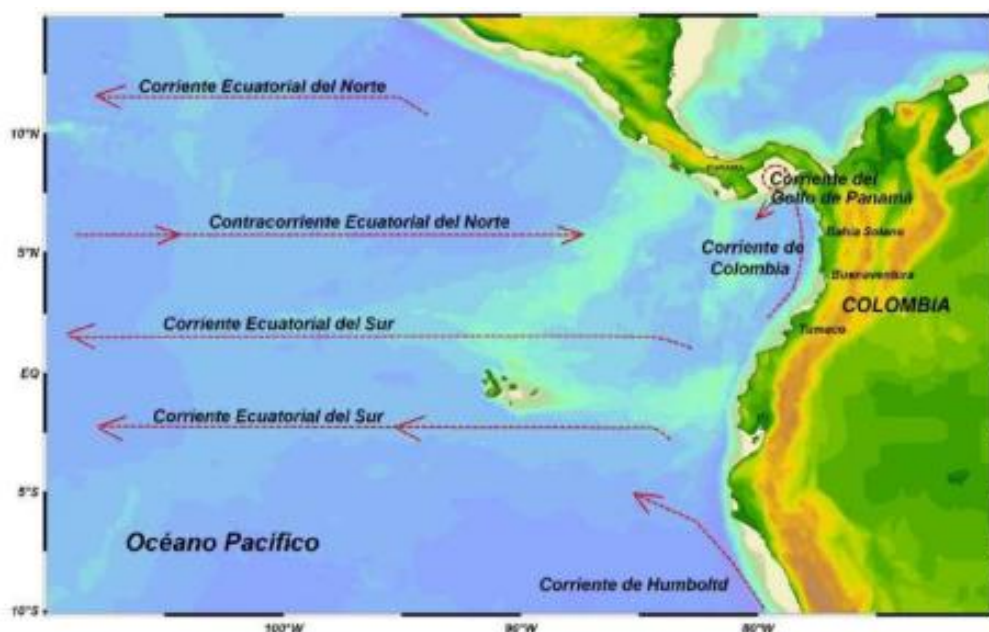


Figura 5. Sistema de corrientes oceánicas del Pacífico sur. Fuente: (INVEMAR, 2010).

El movimiento del aire frío o cálido que interactúan con el océano, genera un desplazamiento vertical, ya sea ascendente o descendente, en la columna de agua o termoclina (Huguet Alzina, 2017), cuando las corrientes superficiales divergen, producen una surgencia que se traduce en el afloramiento de aguas ricas en nutrientes (Schneider et al., 2004). Cuando el agua de la superficie del mar se aleja de las costas, es reemplazada por el agua de las profundidades, lo que origina las corrientes ascendentes o surgencias. Este efecto provoca que los nutrientes del fondo de mar lleguen a la superficie, resultando en una alta productividad primaria superficial (Dembicki, 2016).

Justo en frente de la costa de Chile se encuentra el Alta Subtropical del Pacífico Sur (SPSH), una zona anticiclónica que se forma gracias a los giros del viento en esta zona de altas presiones. Esta alta interactúa con las corrientes oceánicas de la zona lo que favorece los procesos de surgencias en invierno frente de la costa de Perú y Chile (Ancapichún & Garcés-Vargas, 2015). Otro aspecto que caracteriza al océano Pacífico

oriental es la zona mínima de oxígeno (OMZ) que se ubica entre 50 y 100 m de profundidad y se asocia directamente a los procesos de surgencias (Paulmier & Ruiz-Pino 2009; Noone et al., 2013). Cuando los nutrientes ascienden de las profundidades gracias a las surgencias, aumenta los procesos de descomposición por parte de los microorganismos, el consumo de oxígeno aumenta en la superficie por los procesos de respiración y origina la OMZ (Bertagnolli & Stewart, 2018). en estas zonas predominan microorganismos anaerobios capaces de obtener energía mediante procesos de desnitrificación o reducción de sulfato (Fenche et al., 2012).

Las OMZ limita la distribución de especies incluidas las de *S.lewini* que junto con la temperatura restringen sus migraciones verticales y horizontales. Según un estudio llevado a cabo por Jorgensen y colaboradores (2009) en el pacífico de California, tiburones de *S.lewini* fueron marcados con etiquetas emergentes de archivo satelital (PSATs) para tener conocimiento sobre sus movimientos. Se determino que los tiburones llegan en promedio a profundidades de 360 m, pero solo recorren un máximo de 1000 m de profundidad (Bezerra et al., 2019). Toleran rangos de temperatura que van desde los 4.8°C y 27.8°C, aunque, a su vez depende de la movilidad de la termoclina, un aspecto que influencia directamente sobre los movimientos verticales de estos tiburones (Ketchum et al., 2012b).

Por otro lado, la OMZ también se convierte en una zona de refugio para organismos con adaptaciones a concentraciones bajas de oxígeno, lo que limita la depredación y la competencia (Chavez et al., 2008). De igual forma, esta actúa como una barrera que provoca la migración de organismos dentro de la columna de agua (Fernández-Álamo & Färber-Lorda, 2006; Paulmier & Ruiz-Pino 2009). Como este proceso se asocia principalmente a fenómenos de eutrofización, se considera que actualmente la OMZ está en una constante expansión (Stramma et al., 2012). Por lo tanto, se podría convertir en un factor que induzca la mortalidad de grandes masas de peces (Chan et al., 2008), incluso de especies meso pelágicas como los tiburones, ballenas, tortugas marinas, focas, entre otros (Naito et al., 2017).

Una mayor disponibilidad de nutrientes y una disminución en las concentraciones de oxígeno permite la proliferación de especies que encabezan la cadena alimenticia como lo son el fitoplancton y el zooplancton (Chavez et al., 2008). Siendo el principal alimento de especies de interés comercial como lo es el atún (*Thunnus orientalis*), las sardinas (*Sardinops sagax*) y la anchoveta (*Engraulis ringens*) en el Pacífico peruano (Oyarzún & Brierley, 2019). No obstante, la abundancia de estas especies se asocia a una demanda comercial donde se implementan diferentes técnicas pesqueras que, sin una buena administración, contribuye a una pérdida de biodiversidad marina (Gattusso et al., 2020). Especies pelágicas como el tiburón sedoso (*Carcharhinus falciformis*), tiburón martillo común (*Sphyrna lewini*), tiburón martillo gigante (*Sphyrna Zygaena*), entre otros, normalmente abundan la zona por la disponibilidad de alimento. Sin embargo, a causa, de la actividad pesquera muchos de estos ejemplares son capturados de forma incidental amenazando con el futuro de sus poblaciones (Lezama-Ochoa et al., 2017; Coetzee et al., 2020).

1.5. Dinámica atmosférica regional del Pacífico sur

La zona ecuatorial por su ubicación recibe la gran mayoría de la radiación solar, lo que hace que las presiones atmosféricas sean más bajas en esta zona. Cuando los vientos alisios provenientes del hemisferio norte y los del hemisferio sur se encuentran, forman la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Reyna Moreno et al., 2013). Actualmente, se considera uno de los sistemas meteorológicos de gran importancia, forma un cinturón que rodea el ecuador entre 30°N y 30°S (Huguet Alzina, 2017). Los vientos del sur y del norte transportan grandes cantidades de agua y calor, cuando se encuentran se convierte en una zona de alta nubosidad y precipitaciones (Villegas et al., 2012).

Las corrientes de los océanos influyen en el movimiento latitudinal de la ZCIT, lo que permite una migración en la zona tropical de sur-norte-sur con una duración de 6 meses (Acevedo & Hernández, 2013). Dependiendo como se mueva la ZCIT, el patrón del movimiento de los vientos cambia. Cuando la zona de convergencia se encuentra en el sur, durante los meses de enero a marzo, los vientos alisios del norte soplan con una mayor intensidad. Por otro lado, cuando la ZCIT se encuentra al norte, durante los meses de mayo a agosto, los vientos alisios del sur tendrán a predominar más (Daza Suárez, 2017). Los vientos alisios juegan un papel importante en la climatología del mundo. Por ejemplo, en el pacífico modulan el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO), lo que determinará el comportamiento de las precipitaciones del este y oeste del Pacífico tropical (Li et al., 2019).

ENSO se compone de dos fases: las condiciones normales y las anomalías positivas cuando se presenta un calentamiento oceánico extremo (El Niño) o negativas cuando un enfriamiento (La Niña) en el pacífico Tropical (WMO, 2014). Esta variabilidad de la temperatura superficial del océano (SST) se relaciona con el debilitamiento o fortalecimiento de los vientos Alisios del Este (Montealegre, 2014). Cuando El Niño se presenta, ocurre un debilitamiento de los vientos alisios que conlleva a un aumento en SST por ende un incremento en la termoclina; así como, un relajamiento de las condiciones subóxicas en la columna de agua. La Niña se asocia a un enfriamiento de SST gracias al fortalecimiento de los vientos alisios. De este modo, estas anomalías son moduladas por la interacción existente entre la atmósfera y océano (Navarro-Monterroza et al., 2019).

ENSO inicia en el Pacífico Sur cerca de Australia e Indonesia (Figura 6A), durante el verano austral. La SST se eleva unos grados e inicia su recorrido hacia el oriente, hasta llegar a las costas de Suramérica. Durante este fenómeno las presiones atmosféricas son bajas en Tahiti y elevadas en Darwin, obteniendo un SOI negativo (Fenómeno de El Niño) (Figura 6B). Si ocurre lo contrario, las temperaturas disminuyen y se obtiene un SOI positivo corresponde a un fenómeno de La Niña (Figura 6C) (Iglesias, 2010). De forma general, la fase de El Niño da lugar al aumento de las temperaturas superficiales del océano Pacífico tropical. Esto altera la dinámica de circulación de los vientos, las

presiones atmosféricas y las precipitaciones en la zona; generando perturbaciones hidroclimáticas en la zona tropical y subtropical del mundo (Poveda, 2004).

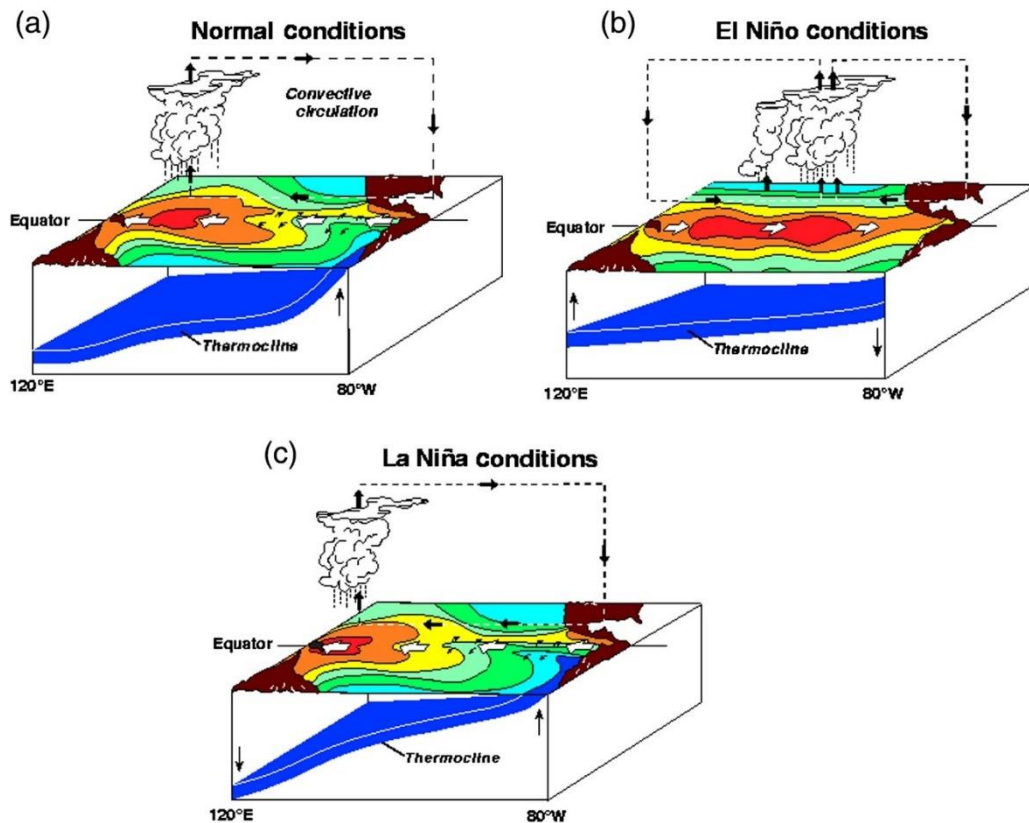


Figura 6. Diagrama esquemático de ENSO. A) Condiciones normales. B) El Niño. C) La Niña. Los colores cálidos indican temperaturas altas de la superficie del océano, y los fríos indican temperaturas bajas de la superficie oceánica. La banda azul representa la posición de la termoclina en cada una de las fases de ENSO Fuente: (Scaife et al., 2019).

1.6. Dinámica de las migraciones del tiburón martillo durante ENSO en el CMAR

Malpelo ubicado $3^{\circ}58'N$ y $81^{\circ}37'O$ a 490 km del puerto de Buenaventura en la costa pacífica de Colombia (Bessudo et al., 2011a) permite que tenga una dinámica oceanográfica muy importante. Según Rodríguez-Rubio et al., (2007) la isla está influenciadas por diferentes corrientes como la Corriente Ecuatorial del Norte, la Corriente Ecuatorial del Sur, la Corriente de Colombia y la Corriente Ciclónica de Panamá. Las cuales a su vez está fuertemente influenciadas por fenómenos climáticos como la ZCIT y ENSO (Devis-Morales et al., 2008). El flujo de la ZCIT de forma vertical asciende y desciende en la parte media de la Tierra permitiendo que se forme la célula de Hadley. El aire húmedo y cálido que converge en la ZCIT asciende y luego que el aire se enfría, desciende formando un ciclo repetitivo que da lugar a la celda de Hadley (Schott et al., 2004). Este comportamiento crea un flujo de energía que al cambiar altera

la intensidad de las lluvias y que a su vez modula a ENSO (Kang et al., 2014). De este modo, se considera que las circulaciones atmosféricas interactúan con las circulaciones oceánicas, lo que permite modificar las condiciones térmicas en el mundo (Schneider et al., 2014).

Según lo reportado por Bessudo et al., (2011a) la isla de Malpelo cuenta con dos temporadas: la fría que inicia en enero y finaliza en abril (Rodríguez-Rubio & Stuardo, 2002), en este momento el agua mantiene una temperatura que varía entre los 20 y 27 °C y la termoclina se mantiene a menos de 15m de profundidad (Rodríguez-Rubio et al., 2007). Gracias a las surgencias que ocurren en el Pacífico oriental sur la temperatura del agua es más fría y turbia por el ascenso de nutrientes gracias a este fenómeno (Dembicki, 2016). Por otro lado, la temporada cálida inicia en mayo y finaliza en diciembre (Rodríguez-Rubio & Stuardo, 2002), la temperatura del agua superficial permanece sobre los 27 °C, es mucho más clara y la termoclina permanece sobre los 50 m de profundidad (Devis-Morales et al., 2008; Bessudo et al., 2011a).

Para la Isla Galápagos, el régimen oceanográfico está determinado por la corriente fría de Humboldt proveniente del sudeste, la corriente fría de Cromwell proveniente del oeste y la corriente cálida de Panamá proveniente del noroeste (Ketchum et al., 2014b) (Figura 7). Influenciadas por la ZCIT, permiten que en la isla se presenten dos patrones temporales una cálida y otra fría. La temporada cálida va de diciembre a junio y la temporada fría de julio a noviembre (Ketchum et al., 2014a). Por otro lado, Isla Coco influenciada por la Contracorriente Ecuatorial del Norte (NECC), predominante entre agosto y septiembre (Nalesso et al., 2019) muestra un patrón de temporadas cálida y fría diferente. La temporada cálida va de enero a junio y la fría de julio a diciembre (Bessudo et al., 2011b).

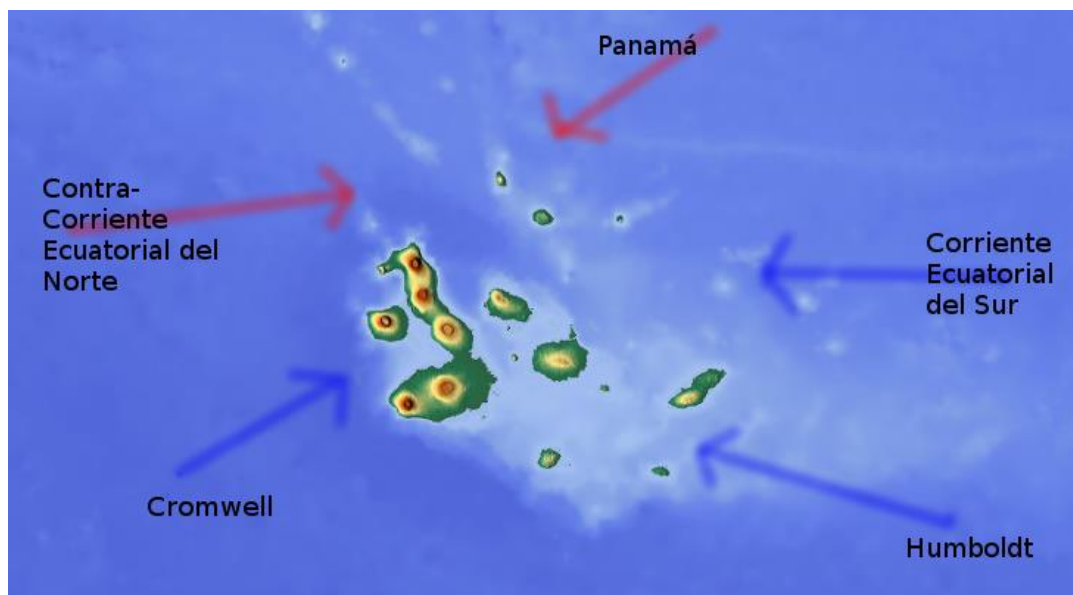


Figura 7. Sistema de corrientes oceánicas de la Isla Galápagos, Ecuador (Braxmeier, 2010).

Por estas características oceanográficas y climáticas con las que cuentan las islas que estos organismos habitan, se considera que los tiburones martillo tiene un comportamiento estacional que varía según la temporada (Ketchum et al., 2014a). De este modo se cree que en el ETP su distribución y abundancia se ven afectadas por el fenómeno de El Niño (Bessudo et al., 2011a) y se tienden a mover en dirección contraria a la línea ecuatorial (Lea & Rosenblatt, 2000). Lo anterior coincide con Klimley & Butler (1988), quienes consideran que *S.lewini* emigra en respuesta a la disminución de la SST y regresan en respuesta al aumento de la SST. Asimismo, la dinámica de corrientes que en estas zonas se presenta permiten que los tiburones nadan a través de ellas para llegar a las islas que habitan (Ketchum et al., 2014b).

Las migraciones entre las islas de ETP que conllevan a recorrer largas distancias mayores a los 300 Km, ocurren en las temporadas cálidas (Ketchum et al., 2014b). Esto permite que su metabolismo aumente y mejore su eficiencia de nado e inmersiones (Papastamatiou et al., 2015), de este modo llegan a las islas Malpelo y Coco en menos de 30 días (Ketchum et al., 2014b). En estas islas la abundancia del tiburón martillo aumenta en las temporadas frías coincidiendo con las surgencias y en aumento de la productividad primaria (Dembicki, 2016). Por lo tanto, en este momento su gasto energético disminuye al igual que su temperatura corporal lo que permite aumentar la eficiencia digestiva (Papastamatiou et al., 2015).

1.6.1. Migraciones de *Sphyrna lewini* en el CMAR

Los tiburones martillo tienen una alta movilidad entre islas ETP, se cree que sus migraciones se dan principalmente entre la Isla Malpelo, Isla Coco y Galápagos (Figura 8) (Bessudo et al., 2011a; Ketchum et al., 2014a). Así mismo su abundancia varía según la temporada y la zona de agregación. En Malpelo y en Isla Coco, los tiburones martillo son más abundantes durante la temporada de La Niña en comparación a la temporada de El Niño, asociado a una mayor disponibilidad de alimento productos de los procesos de surgencia que ocurren en el Pacífico oriental sur (Bessudo et al., 2011b; Friedlander et al., 2012). En contraste, los tiburones son más abundantes durante la temporada de El Niño que en La Niña en Galápagos (Ketchum et al., 2014a).

Los tiburones martillo se caracterizan por tener una alta movilidad horizontal y vertical. Además de los recorridos de largas distancias, se cree que el movimiento horizontal en periodos de tiempo cortos se da por varias razones. Se alejan para poder cazar y buscar a sus presas en zonas donde las corrientes son más rápidas y muchos peces viajan a través de ellas (Ketchum et al., 2014a). Luego retornan a la isla, la utilizan como refugio y zona de descanso, la velocidad de las corrientes es más lenta, allí los peces los limpian y liberan de parásitos (Zanella et al., 2016). De forma similar ocurre con los movimientos verticales durante la noche. Se cree que nada a zonas más

profundas en búsqueda de alimento, realizando inmersiones en forma de “yo-yo” (Gallagher & Klimley, 2018).



Figura 8. Rutas migratorias de *Sphyrna lewini* a través de las islas oceánicas que hacen parte del CMAR (<http://cmarpacifico.org/web-cmar/que-hacemos/biodiversidad-y-ciencias/>).

En lo que respecta a sus movimientos verticales, Bessudo et al., (2011a) considera que hay una relación directamente proporcional entre la termoclina y el movimiento de *S.lewini*. A medida que la termoclina se eleva, es decir, cerca de los 15 m de profundidad, los tiburones se mueven hacia la superficie, lo que coincide con la temporada de La Niña cuando la SST es más fría. Si la termoclina permanece en el fondo cerca a los 50 m, los tiburones tienden a nadar en zonas más profundas, cuando inicia la temporada de El Niño, cuando la SST es más cálida. Este comportamiento también ha sido reportado por otros científicos en otras islas del Pacífico oriental como Galápagos e Isla Coco (Friedlander et al., 2012; Ketchum et al., 2014). Los gradientes de temperatura sugieren ser un mecanismo de navegación para los tiburones. Ellos son altamente selectivos en hábitat y locación, por lo que prefieren lugares donde pueden termorregular, refugiarse y disminuir el costo energético (Ketchum et al., 2014a). La mayoría de estos tiburones muestran una preferencia por

mantenerse en algunas islas durante varios meses al año. Se piensa que la razón principalmente se debe a que allí pueden llegar a formar “schools” (Meyer et al., 2007; Ketchum et al., 2014b).

1.6.2. Migraciones de *Sphyrna lewini* y zonas de pesca

La alta movilidad que tiene estos tiburones entre las islas del ETP y su preferencia en la mayoría de los casos a permanecer en las aguas superficiales, lo convierte en unos organismos altamente amenazados por la pesca industrial (Bessudo et al., 2011b). A pesar de la existencia de las AMP para proteger y conservar esta especie, se debe tener en cuenta que los tiburones tienden a estar dentro y fuera de las islas a diario. Por lo tanto, su protección es aún más limitada principalmente en las noches cuando se cree, salen de las islas a forrajear (Chávez et al., 2020). Esto los convierte en víctimas de las redes de palangre que suelen dejar toda la noche hasta el amanecer. Al ser tiburones con ventilación ram, deben seguir nadando para lograr respirar, al quedar atrapados en las redes los tiburones se ahogan y mueren (Nalesso et al., 2019).

La pesca industrial también afecta gravemente el futuro reproductivo de los tiburones cuando se capturan hembras embarazadas. Ellas nadan hacia las costas o zonas someras para dar a luz, preferiblemente en ecosistemas de manglar (Salinas-de-León et al., 2017). Estas áreas son importantes para los neonatos al brindarles alimentos, refugio y protección de depredadores (Estupiñán-Montaña et al., 2017). No obstante, muchas de las crías son atrapadas incidentalmente por las redes que son usadas por los pescadores artesanales como las atarrayas, redes de trasmallo o chinchorros. Convirtiéndose en una causa que ha evitado que la población de estos elasmobranquios se recupere (Zanella & López-Garro, 2015).

De este modo, los tiburones martillo son muy susceptibles a ser pescados en las zonas costeras y oceánicas de EPT. Esto se ha convertido en una gran amenaza que ha llevado a que su población disminuya cerca de un 90% en los últimos años (Hoyos-Padilla et al., 2014). Antes era habitual ver grandes cardúmenes de tiburones martillo, pero actualmente solo se ven unos pocos durante ciertas temporadas (Pérez-Jiménez, 2014).

1.6.3. Reproducción de *Sphyrna lewini* y su relación con ENSO en el CMAR

Según Salinas de León y colaboradores (2017), la reproducción de *S.lewini* se presenta entre los meses de julio y octubre a 40 m de profundidad, relativamente cerca de la superficie y en lugares adyacentes a las islas que ellos habitan. Durante algunos meses la abundancia de estos tiburones disminuye en las islas del ETP y se cree que coincide con las temporadas de nacimiento de los neonatos.

Bessudo et al., (2011a) reporta que en Malpelo los tiburones dejan la isla entre marzo y abril. En Galápagos ocurre entre marzo y junio de forma similar que en Malpelo

(Hearn et al., 2010a) y en Isla Coco se da entre mayo y junio (Zanella & López-Garro, 2015). Para la mayoría de los casos se determina que las hembras dan a luz justo en la transición entre la temporada cálida a la fría. Coincidiendo con el inicio del fenómeno de La Niña, sinónimo de una alta productividad primaria que se reflejara en la abundancia de alimento para los recién nacidos (Dembicki, 2016). De este modo, el tope de avistamientos de crías que se presenta entre marzo y junio según lo reportado por Salinas de León et al., (2017) y entre julio y agosto según lo reportado por Zanella & López-Garro (2015).

1.7. Variabilidad climática y biodiversidad del Pacífico sur

El océano Pacífico oriental alberga una gran biodiversidad de especies pelágicas. No obstante, la demanda pesquera y las malas prácticas han contribuido a disminuir poblaciones de interés comercial, así como poblaciones de especies que ya están sobreexplotados (Sumaila & Tai, 2020). Otra amenaza para la zona y la biodiversidad que allí se encuentra se relaciona con los efectos de la variabilidad climática (Oyarzun et al., 2019). El aumento de las temperaturas en el océano por efecto del cambio climático ha tenido un efecto directo sobre la distribución de especies marinas (Pinsky et al., 2013). La principal evidencia de esto se relaciona con las olas marinas de calor (MHW), que se refiere a un aumento de la temperatura oceánica alcanzando valores anormales y que se caracteriza por su intensidad y frecuencia (Hobday et al., 2018). Este fenómeno ha provocado afectaciones negativas en los ecosistemas marinos, donde se ha evidenciado mortalidad de diferentes especies, cambios en la distribución y estructura del ecosistema (Smale et al., 2019). En respuesta algunas especies pelágicas tienden a moverse hacia latitudes más altas para evitar los aumentos de temperatura tan elevados, el mismo mecanismo que aplican durante la temporada cálida del ENSO (Lonhart et al., 2019).

Aravena et al., (2014) y Rykaczewsk et al., (2015), consideran que el cambio climático va a alterar los patrones naturales de lluvias y procesos de surgencias, por lo que se espera que a futuro haya un impacto directo sobre la ecología y economía del Pacífico oriental sur. Aunque es difícil predecir los efectos que puede tener la variabilidad climática sobre el área se han planteado dos escenarios en donde los procesos de surgencia se pueden ver desfavorecidos o favorecidos.

Según Zheng et al., (2016) y Fosu et al., (2020) la SST tendera a aumentar para la zona ecuatorial del océano Pacífico, debido al debilitamiento de la circulación de Walker y la estratificación del océano. Con el aumento de la temperatura en especial en las zonas costeras, se podrá genera un cambio en la termoclina y una mayor estratificación que generará menor disponibilidad de nutrientes y un debilitamiento de las surgencias subsuperficiales, por debajo de los 100m. Lo anterior podría tener impactos directos sobre la ecología de especies asociados a la zona (Aravena et al., 2014; Oyarzún & Brierley, 2019). El aumento de la SST podría traer consigo afectaciones en el metabolismo y fisiología de algunos organismos marinos como se ha observado en algunos condricios. A medida que se aumentan 10°C se puede llegar a duplicar o

triplicar la tasa metabólica, lo que a su vez incrementa el consumo de oxígeno (Bernal et al., 2012).

Sin embargo, otros autores consideran que las condiciones del cambio climático favorecerán los vientos y los sistemas de corriente, lo que permitirá el incremento de las surgencias y por lo tanto el afloramiento de la productividad primaria (Bakun et al., 2015; Xiu et al., 2018). Algunos modelos climáticos bajo escenario de cambio climático sugieren que en la zona sur del Pacífico justo al frente de la costa de Chile, los vientos serán mucho más fuertes debido al desplazamiento del anticiclón del Pacífico Sur (Belmadani et al., 2014; Briceño-Zuluaga et al., 2016; Flores-Aqueveque et al., 2020). Esto favorecerá el enfriamiento de la SST y a su vez favorecer el aumento de la salinidad debido a la disminución de precipitaciones (Xiu et al., 2018). Además, se considera que para finales de este siglo las surgencias serán mucho más predominantes (Wang et al., 2015), mostrando unas condiciones ideales para la biodiversidad de la zona, favoreciendo el establecimiento de diferentes especies pelágicas como *S.lewini* (Chavez et al., 2008).

1.8. CONCLUSIONES

El océano Pacífico oriental se caracteriza por ser una zona de alta productividad primaria que permite albergar una gran diversidad de especies marinas en las que se incluyen algunas de interés económico como *Thunnus orientalis*, *Sardinops sagax* y *Engraulis ringens*. La abundancia de especies en esta zona se debe a una dinámica atmosférica y oceánica, donde se incluyen procesos de surgencias, corrientes, vientos, modos y mecanismos como ENSO y la ZCIT, quienes modulan las condiciones para su establecimiento. No obstante, la biodiversidad del área se encuentra fuertemente amenazada por la sobrepesca, que ha provocado cambios en las poblaciones de las especies, además del cambio climático, del que se especulan posibles consecuencias para las especies.

La variabilidad climática evidencia generar cambios en la dinámica océano-atmósfera del Pacífico, lo que genera afectaciones directas sobre las especies. Esto se traduce en cambios de distribución, fisiología, metabolismo y en la estructura del ecosistema. Aunque es difícil predecir como el cambio climático afectará la climatología del océano Pacífico, se proponen dos hipótesis. En la primera, se postula un incremento en los procesos de surgencias, ocasionando un aumento en la productividad primaria que favorecerá la biodiversidad de la zona. En la segunda, se considera que los procesos de surgencias disminuirán por la estratificación del océano, lo que implica cambios en la ecología de las especies asociadas a la zona.

Por otro lado, hay una fuerte relación entre las variables climáticas y los fenómenos oceanográficos del ETP que afectan directamente la ecología del tiburón martillo. El Niño resulta ser un fenómeno climático que determina el inicio de las migraciones de los tiburones hacia zonas de menor temperatura y con mayor abundancia de alimento, es decir, zonas de mayor productividad primaria. Esas migraciones se pueden dar de forma

vertical hacia zonas más profundas o zonas superficiales y de forma horizontal hacia otras islas del ETP. Áreas que los tiburones martillo utilizan como zonas de refugio, de alimento, de reproducción y de crianza.

La termoclina resulta ser un factor que determina la distribución vertical de tiburón en la columna de agua, por lo tanto, hay una relación directamente intrínseca entre este fenómeno y su respuesta migratoria. De tal manera que, cuando se presenta el fenómeno de El Niño o de La Niña que determina el movimiento de la termoclina, así mismo será la respuesta del tiburón en la columna de agua. Por lo tanto, la distribución vertical y horizontal de *S.lewini* se ve afectada por variables como la temperatura y la disponibilidad de oxígeno cuando realiza sus inmersiones. En profundidad lo máximo que puede llegar a recorrer son 1000 m, siendo los 350 m la profundidad donde es habitual encontrarlos. En cuanto a la temperatura suelen encontrarse entre 4.8°C y 27.8°C, lo que explica porque tienden a moverse en forma de “yo-yo” cuando se sumergen.

Para las tres islas del ETP se determina que están regidas por dos temporadas la cálida y la fría, que a su vez es influenciada por los mecanismos del ENSO y la ZCIT. En Isla Coco y Malpelo la abundancia del tiburón aumenta con el fenómeno de La Niña, es decir, en la temporada fría coincidiendo con las surgencias, aumento de la productividad primaria y alimento. En las temporadas cálidas la productividad primaria disminuye al igual que la disponibilidad de alimento, lo que determina el inicio de las migraciones de los tiburones hacia otras islas. El aumento de la temperatura superficial del océano favorece el movimiento horizontal del tiburón. Al ser un organismo ectotermo su metabolismo aumenta y permite que su nado e inmersiones sean más eficientes para llegar a las otras islas del ETP en menor tiempo.

1.9. BIBLIOGRAFÍA

1. Ancapichún, S., & Garcés-Vargas, J. (2015). Variabilidad del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste y su impacto sobre la temperatura superficial del mar frente a la costa centro-norte de Chile. *Ciencias marinas*, 41(1), 1-20.
2. Aguilar Castro, N. A. (2003). Ecología trófica de juveniles del tiburón martillo *Sphyrna lewini* (Griffith & Smith, 1834) en el Golfo de California (Doctoral dissertation, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas).
3. Acevedo, J. A. A., & Hernández, G. M. V. (2013). Fenología de ambientes tropicales en el marco de la teledetección. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (13_2), 195-211.

4. Balasubramanian, A. (2014). *Oceanography: The Pacific Ocean*. University of Mysore, Mysore, India.
5. Baum, J. K., & Worm, B. (2009). Cascading top-down effects of changing oceanic predator abundances. *Journal of animal ecology*, 78(4), 699-714.
6. Bessudo, S., Soler, G. A., Klimley, A. P., Ketchum, J. T., Hearn, A., & Arauz, R. (2011a). Residency of the scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) at Malpelo Island and evidence of migration to other islands in the Eastern Tropical Pacific. *Environmental Biology of Fishes*, 91(2), 165-176.
7. Bessudo, S., Soler, G. A., Klimley, P. A., Ketchum, J., Arauz, R., Hearn, A., ... & Calmettes, B. (2011b). Vertical and horizontal movements of the scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) around Malpelo and Cocos Islands (Tropical Eastern Pacific) using satellite telemetry. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, 40, 91-106.
8. Bezerra, N. P. A., Macena, B. C. L., Travassos, P., Afonso, P., & Hazin, F. H. V. (2019). Evidence of site fidelity and deep diving behaviour of scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) around the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, in the equatorial Mid-Atlantic ridge. *Marine and Freshwater Research*.
9. Braxmeier, H. (2010). Corrientes marinas de Galápagos. [Figura]. Recuperado de <https://ecuadorgalapagosinfo.com/islas-galapagos/corrientes-marinas/>
10. Bressan, A., & Constantin, A. (2019). The deflection angle of surface ocean currents from the wind direction. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(11), 7412-7420.
11. Briceño-Zuluaga, F. J., Sifeddine, A., Caquineau, S., Cardich, J., Salvattecí, R., Gutierrez, D., ... & Machado, C. (2016). Terrigenous material supply to the Peruvian central continental shelf (Pisco, 14° S) during the last 1000 years: paleoclimatic implications. *Climate of the Past*, 12(3), 787-798.
12. Camino, E. R. (2018). Anomalía de temperatura de la superficie del mar (SST). *Revista Tiempo y Clima*, 5(59).
13. Chan, F., Barth, J. A., Lubchenco, J., Kirincich, A., Weeks, H., Peterson, W. T., & Menge, B. A. (2008). Emergence of anoxia in the California current large marine ecosystem. *Science*, 319(5865), 920-920.
14. Chávez, E. J., Arauz, R., Hearn, A., Nalesso, E., & Steiner, T. (2020). Asociación de tiburones con el Monte Submarino Las Gemelas y primera evidencia de conectividad con la Isla del Coco, Pacífico de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 68(S1), S320-S329.
15. Chavez, F. P., Bertrand, A., Guevara-Carrasco, R., Soler, P., & Csirke, J. (2008). The northern Humboldt Current System: Brief history, present status and a view towards the future. *Progress in Oceanography*, 79(2-4), 95-105
16. Chavez, F. P., Ryan, J., Lluch-Cota, S. E., & Niquen, M. (2003). From anchovies to sardines and back: multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science*, 299(5604), 217-221.
17. Clarke, S., Coelho, R., Francis, M., Kai, M., Kohin, S., Liu, K. M., ... & Smart, J. (2015). Report of the pacific shark life history expert panel workshop, 28-30 april

2015. Western Central Pacific Fisheries Commission Scientific Committee eleventh regular session. Recuperado de <https://www.wcpfc.int/system/files/EB-IP-13%20Workshop%20Shark%20Life%20History%20Expert%20Panel%202.pdf>
18. Coetzee, H. J., Naidoo, K., & Wagenaar, I. (2020). A first observation of spermatogenesis in mature male scalloped hammerheads (*Sphyrna lewini*) from Zinkwazi, KwaZulu-Natal, South Africa. *Fish Physiology and Biochemistry*, 1-11.
 19. Coiraton, C., & Amezcua, F. (2020). In utero elemental tags in vertebrae of the scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini* reveal migration patterns of pregnant females. *Scientific reports*, 10(1), 1-13.
 20. Coiraton, C., Tovar-Ávila, J., Garcés-García, K. C., Rodríguez-Madrigal, J. A., Gallegos-Camacho, R., Chávez-Arrenquín, D. A., & Amezcua, F. (2019). Periodicity of the growth-band formation in vertebrae of juvenile scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini* from the Mexican Pacific Ocean. *Journal of fish biology*, 95(4), 1072-1085.
 21. Daza Suárez, A. (2017). Propuesta de regionalización del Pacífico Colombiano a partir de imágenes de color del océano (Bachelor's thesis, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano).
 22. Dembicki, H. (2016). Practical petroleum geochemistry for exploration and production. *Elsevier*.
 23. Devis-Morales, A., Schneider, W., Montoya-Sánchez, R. A., & Rodríguez-Rubio, E. (2008). Monsoon-like winds reverse oceanic circulation in the Panama Bight. *Geophysical Research Letters*, 35(20).
 24. Drew, M., White, W. T., Dharmadi, Harry, A. V. and Huveneers, C. 2015. Age, growth and maturity of the pelagic thresher *Alopias pelagicus* and the scalloped hammerhead *Sphyrna lewini*. *Journal of Fish Biology*, 86(1): 333-354
 25. Duffy, L. M., Olson, R. J., Lennert-Cody, C. E., Galván-Magaña, F., Bocanegra-Castillo, N., & Kuhnert, P. M. (2015). Foraging ecology of silky sharks, *Carcharhinus falciformis*, captured by the tuna purse-seine fishery in the eastern Pacific Ocean. *Marine Biology*, 162(3), 571-593.
 26. Estupiñán-Montaña, C., Cedeño-Figueroa, L. G., & Galván-Magaña, F. (2009). Hábitos alimentarios del tiburón martillo *Sphyrna lewini* (Griffith & Smith, 1834) (Chondrichthyes) en el Pacífico ecuatoriano. *Revista de biología marina y oceanografía*, 44(2), 379-386.
 27. Estupiñán-Montaña, C., Galvan-Magana, F., Tamburín, E., Sanchez-Gonzalez, A., Villalobos-Ramírez, D. J., Murillo-Bohórquez, N., ... & Estupiñán-Ortiz, J. F. (2017). Trophic inference in two sympatric sharks, *Sphyrna lewini* and *Carcharhinus falciformis* (elasmobranchii: carcharhiniformes), based on stable isotope analysis at Malpelo Island, Colombia. *Acta Ichthyologica et Piscatoria*, 47(4), 357-364.
 28. Evans, K., Bax, N., Bernal, P., Corrales, M. B., Cryer, M., Forsterra, G., ... & Rice, J. (2016). D. South Pacific Ocean. Recuperado de https://www.un.org/depts/los/global_reporting/WOA_RPROC/Chapter_36D.pdf%20consultado%2025.03.2020

29. Fernández-Álamo, M. A., & Färber-Lorda, J. (2006). Zooplankton and the oceanography of the eastern tropical Pacific: a review. *Progress in Oceanography*, 69(2-4), 318-359.
30. Field, I. C., Meekan, M. G., Buckworth, R. C., & Bradshaw, C. J. (2009). Susceptibility of sharks, rays and chimaeras to global extinction. *Advances in marine biology*, 56, 275-363.
31. Flores Aqueveque, V., Rojas, M., Aguirre, C., Arias, P. A., & González, C. (2020). South Pacific Subtropical High from the late Holocene to the end of the 21st century: insights from climate proxies and general circulation models. *Clim Past* 16(1):79–99
32. Friedlander, A. M., Zgliczynski, B. J., Ballesteros, E., Aburto-Oropeza, O., Bolaños, A., & Sala, E. (2012). The shallow-water fish assemblage of Isla del Coco National Park, Costa Rica: structure and patterns in an isolated, predator-dominated ecosystem. *Revista de Biología Tropical*, 60, 321-338.
33. Gallagher, A. J., & Klimley, A. P. (2018). The biology and conservation status of the large hammerhead shark complex: the great, scalloped, and smooth hammerheads. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 28(4), 777-794.
34. Hays, G. C. (2017). Ocean currents and marine life. *Current Biology*, 27(11), 470-473.
35. Hearn A., Klimley, P., & Peñaherrera, C. (2010a). Hotspots within hotspots? Hammerhead shark movements around Wolf Island. Galapagos Marine Reserve. *Marine Biology*, 157, 1899-1915
36. Hearn, A., Ketchum, J., Klimley, A. P., Espinoza, E., & Penaherrera, C. (2010b). Hotspots within hotspots? hammerhead shark movements around wolf island, galapagos marine reserve. *Marine Biology*, 157(9), 1899-1915.
37. Hernández Rodríguez, M. A. (2017). Movimientos de sub-adultos de tiburón martillo, *Sphyrna lewini*, en las Islas Galápagos. Tesis de pregrado. Universidad San Francisco de Quito, Ecuador.
38. Heupel, M. R., Carlson, J. K., & Simpfendorfer, C. A. (2007). Shark nursery areas: concepts, definition, characterization, and assumptions. *Marine Ecology Progress Series*, 337, 287-297.
39. Hobday, A. J., Oliver, E. C., Gupta, A. S., Benthuisen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., ... & Smale, D. A. (2018). Categorizing and naming marine heatwaves. *Oceanography*, 31(2), 162-173.
40. Hoffmayer, E. R., Franks, J. S., Driggers, W. B., & Howey, P. W. (2013). Diel vertical movements of a scalloped hammerhead, *Sphyrna lewini*, in the northern Gulf of Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 89(2), 551–557.
41. Hoyos-Padilla, E. M., Ketchum, J. T., Klimley, A. P., & Galván-Magaña, F. (2014). Ontogenetic migration of a female scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini* in the Gulf of California. *Animal Biotelemetry*, 2(1), 17.
42. Huguet Alzina, A. (2017). Estudio experimental de la circulación general atmosférica y oceánica a escala de laboratorio (Tesis de Maestría). Universidad Politécnica de Valencia, España.

43. Iglesias, I. (2010). Interacción océano-atmósfera: Influencia de la SST y de la circulación termohalina (Doctoral dissertation, Tesis doctoral. Universidad de Vigo).
44. INVEMAR. (2010). Especies, ensamblajes y paisajes de los bloques marinos sujetos a exploración de hidrocarburos. Informe de actividades INVEMAR – ANH Fase III-Pacífico Caracterización de la megafauna y el plácton del Pacífico colombiano, Santa Marta, 270p.
45. Jerez-Guerrero, M., Criales-Hernández, M. I., & Giraldo, A. (2017). Copépodos epipelágicos en Bahía Cupica, Pacífico colombiano: composición de especies, distribución y variación temporal. *Revista de Biología Tropical*, 65(3), 1046-1061.
46. Jorgensen, S. J., Klimley, A. P., & Muhlia-Melo, A. F. (2009). Scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini*, utilizes deep-water, hypoxic zone in the Gulf of California. *Journal of Fish Biology*, 74(7), 1682-1687.
47. Kang, S. M., Held, I. M., & Xie, S. P. (2014). Contrasting the tropical responses to zonally asymmetric extratropical and tropical thermal forcing. *Climate dynamics*, 42(7-8), 2033-2043.
48. Ketchum, J.T., Hearn, A., Klimley, A.P., Espinoza, E., Peñaherrera, C., Largier, J.L. (2014a). Seasonal changes in movements and habitat preferences of the scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) while refuging near an oceanic island. *Marine Biology* 161:755–767.
49. Ketchum, J. T., Hearn, A., Klimley, A. P., Peñaherrera, C., Espinoza, E., Bessudo, S., ... & Arauz, R. (2014b). Inter-island movements of scalloped hammerhead sharks (*Sphyrna lewini*) and seasonal connectivity in a marine protected area of the eastern tropical Pacific. *Marine Biology*, 161(4), 939-951.
50. Klimley, A. P., & 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*. Oldendorf, 49(1), 11-20.
51. Lea, R., Rosenblatt, R. (2000). Observations on fishes associated with the 1997–98 El Niño off California. *Reports of California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations* 41,117–129.
52. Li, Y., Chen, Q., Liu, X., Li, J., Xing, N., Xie, F., ... & Wang, Z. (2019). Long-term trend of the tropical Pacific trade winds under global warming and its causes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(4), 2626-2640.
53. Lonhart, S. I., Jeppesen, R., Beas-Luna, R., Crooks, J. A., & Lorda, J. (2019). Shifts in the distribution and abundance of coastal marine species along the eastern Pacific Ocean during marine heatwaves from 2013 to 2018. *Marine Biodiversity Records*, 12(1), 13
54. López-Victoria, M., Cantera, J. R., Díaz, J. M., Rozo, D. M., Posada, B. O., & Osorno, A. (2004). Informe del Estado de los Ambientes y Recursos Marinos y Costeros en Colombia. Año 2003. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR, Santa Marta, Colombia.
55. Maturana, J., Bello, M., & Manley, M. (1997). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. *El Niño-La Niña, 2000*, 13-27.

56. Meyer, C. G., Holland, K. N., & Papastamatiou, Y. P. (2007). Seasonal and diel movements of giant trevally *Caranx ignobilis* at remote Hawaiian atolls: implications for the design of marine protected areas. *Marine Ecology Progress Series*, 333, 13-25.
57. Montealegre, J. E. (2014). Actualización del Componente Meteorológico del Modelo Institucional del ideam sobre el Efecto Climático de los Fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico. Informe Final. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá, Colombia
58. Naito, Y., Costa, D. P., Adachi, T., Robinson, P. W., Peterson, S. H., Mitani, Y., & Takahashi, A. (2017). Oxygen minimum zone: An important oceanographic habitat for deep-diving northern elephant seals, *Mirounga angustirostris*. *Ecology and evolution*, 7(16), 6259-6270.
59. Nalesso, E., Hearn, A., Sosa-Nishizaki, O., Steiner, T., Antoniou, A., Reid, A., ... & Ketchum, J. T. (2019). Movements of scalloped hammerhead sharks (*Sphyrna lewini*) at Cocos Island, Costa Rica and between oceanic islands in the Eastern Tropical Pacific. *PloS one*, 14(3).
60. Navarro-Monterroza, E., Arias, P. A., & Vieira, S. C. (2019). El Niño-Oscilación del Sur, fase Modoki, y sus efectos en la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(166), 120-132.
61. Noone, K. J., Sumaila, U. R., & Diaz, R. J. (2013). Managing ocean environments in a changing climate: sustainability and economic perspectives. Newnes.
62. Papastamatiou, Y. P., Watanabe, Y. Y., Bradley, D., Dee, L. E., Weng, K., Lowe, C. G., & Caselle, J. E. (2015). Drivers of daily routines in an ectothermic marine predator: hunt warm, rest warmer?. *PLoS One*, 10(6).
63. Paulmier, A., & Ruiz-Pino, D. (2009). Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean. *Progress in Oceanography*, 80(3-4), 113-128.
64. Pérez-Jiménez, J. C. (2014). Historical records reveal potential extirpation of four hammerhead sharks (*Sphyrna* spp.) in Mexican Pacific waters. *Reviews in fish biology and fisheries*, 24(2), 671-683.
65. Pinsky, M. L., Worm, B., Fogarty, M. J., Sarmiento, J. L., & Levin, S. A. (2013). Marine taxa track local climate velocities. *Science*, 341(6151), 1239-1242.
66. Pistevo, J. C., Nagelkerken, I., Rossi, T., Olmos, M., & Connell, S. D. (2015). Ocean acidification and global warming impair shark hunting behaviour and growth. *Scientific Reports*, 5(1), 1-10.
67. Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28(107), 201-222.
68. Puentes, V. & Moncaleano, A. (Eds.). (2012). Sistema de Gestión Regional para el Uso Sostenible de los Recursos Pesqueros del Corredor Marino del Pacífico Este Tropical (CMAR). Resultados de Gestión en Colombia. Fundación Malpelo y otros Ecosistemas Marinos. 184 págs.
69. Ramirez, J. (2006). Corrientes oceánicas. *Sigma*, 40, 20.

70. Reyna Moreno, J. A., Devis Morales, A., Cantera Kintz, J. R., Ángel Cárdenas, E., Cabrales Vernaza, E., Lozano Iriarte, J. A., ... & Pardo Rojas, Z. (2013). El Océano Maravilla Terrestre. Comisión Colombiana del Océano.
71. Rivas, M. L., Spínola, M., Arrieta, H., & Faife-Cabrera, M. (2018). Effect of extreme climatic events resulting in prolonged precipitation on the reproductive output of sea turtles. *Animal Conservation*, 21(5), 387–395
72. Roberts, C. M., O’Leary, B. C., McCauley, D. J., Cury, P. M., Duarte, C. M., Lubchenco, J., ... & Worm, B. (2017). Marine reserves can mitigate and promote adaptation to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(24), 6167-6175
73. Rodríguez-Ponga, R. (2014). El océano Pacífico. In El océano pacífico: conmemorando 500 años de su descubrimiento (pp. 143-146). Fundación Ramón Areces.
74. Rodriguez-Rubio, E., & Stuardo, J. (2002). Variability of photosynthetic pigments in the Colombian Pacific Ocean and its relationship with the wind field using ADEOS-I data. *Journal of Earth System Science*, 111(3), 227-236.
75. Romero, M. J. R., & Molina, J. J. C. (2001). La dinámica atmosférica en el flanco suroccidental de Europa: la Península Ibérica. *Nimbus: Revista de climatología, meteorología y paisaje*, (7), 5-20.
76. Rosa, R., Baptista, M., Lopes, V. M., Pegado, M. R., Ricardo Paula, J., Trübenbach, K., ... & Repolho, T. (2014). Early-life exposure to climate change impairs tropical shark survival. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1793), 20141738.
77. Salinas-de-León, P., Hoyos-Padilla, E. M., & Pochet, F. (2017). First observation on the mating behaviour of the endangered scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini* in the Tropical Eastern Pacific. *Environmental Biology of Fishes*, 100(12), 1603-1608.
78. Scaife, A., Guilyardi, E., Cain, M., & Gilbert, A. (2019). What is the El Niño–Southern Oscillation? *Weather*, 74(7), 250–251.
79. Schneider, T., Bischoff, T., & Haug, G. H. (2014). Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature*, 513(7516), 45-53.
80. Schneider, W., Fuenzalida, R., & Garcés, J. (2004). Corrientes marinas y masas de agua. *Biología Marina y Oceanografía: Conceptos y proceso*. Ed. C. Werliger, 1.
81. Schott, F. A., McCreary, J. P., & Johnson, G. C. (2004). Shallow overturning circulations of the tropical-subtropical oceans. *Earth Climate: The Ocean–Atmosphere Interaction, Geophys. Monogr*, 147, 261-304.
82. Sherman, K. & Hempel, G. (2008). The UNEP large marine ecosystem report: a perspective on changing conditions in LMEs of the world’s Regional Seas. UNEP Regional Seas report and studies No. 182. United Nations Environment Programme, Nairobi.
83. Smale, D. A., Wernberg, T., Oliver, E. C., Thomsen, M., Harvey, B. P., Straub, S. C., ... & Feng, M. (2019). Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nature Climate Change*, 9(4), 306-312.

84. Soler, G. A., Bessudo, S., & Guzmán, A. (2013). Long term monitoring of pelagic fishes at Malpelo Island, Colombia. *Latin American Journal of Conservation*, 3(2).
85. Stramma, L., Prince, E. D., Schmidtko, S., Luo, J., Hoolihan, J. P., Visbeck, M., ... & Körtzinger, A. (2012). Expansion of oxygen minimum zones may reduce available habitat for tropical pelagic fishes. *Nature Climate Change*, 2(1), 33-37.
86. Sumaila, U. R., & Tai, T. C. (2020). End overfishing and increase the resilience of the ocean to climate change. *Frontiers in Marine Science*, 7, 523.
87. Tewksbury, J. J., Huey, R. B., & Deutsch, C. A. (2008). Putting the heat on tropical animals. *Science*, 320(5881), 1296-1297.
88. Villegas, N., Barrientos, J. C., & Málikov, I. (2012). Relación entre parámetros oceano-atmosféricos y la producción del café verde en Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(1), 88-95.
89. WMO. (2014). El Niño/ Southern Oscillation. Recuperado de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7888 consultado 23.02.2020)
90. Wunsch, C. (2002). What is the thermohaline circulation? *Science*, 298(5596), 1179-1181.
91. Zanella, I., & López-Garro, A. (2015). Abundancia, reproducción y tallas del tiburón martillo *Sphyrna lewini* (Carcharhiniformes: Sphyrnidae) en la pesca artesanal de Golfo Dulce, Pacífico de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 63, 307-317.
92. Zanella, I., López-Garro, A., McComb-Kobza, D. M., Golfín-Duarte, G., Pérez-Montero, M., & Morales, J. (2016). First record of young-of-the-year Scalloped hammerhead shark, *Sphyrna lewini* (Carcharhiniformes: Sphyrnidae) from Isla del Coco National Park, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 201-204.

1.10

ANEXOS

A continuación, se muestran las gráficas arrojadas por el software VOSviewer asociadas al análisis bibliométrico. La figura 1 muestra el análisis de los autores y grupos de investigación que la figura 2 representa las publicaciones realizado por año de cada autor y a su vez refleja el rango de tiempo que se estableció para realizar la búsqueda de información.

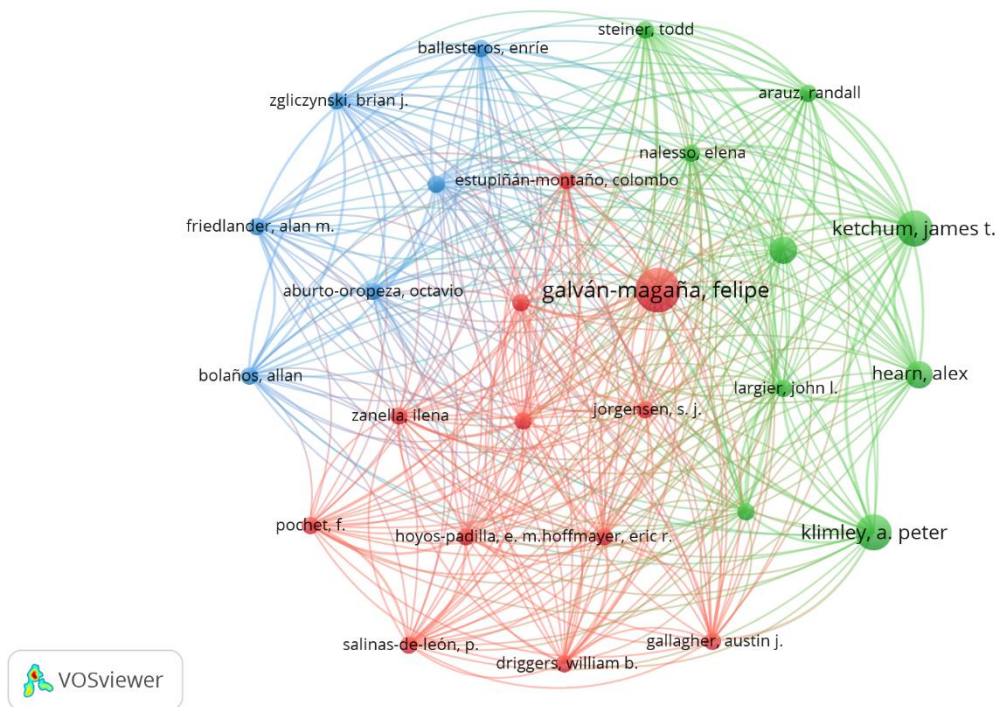


Figura 1. Red de interconexión de los autores de los artículos usados en la revisión. Los círculos representan grupos de investigación o los autores, entra más grande el círculo es porque han realizado un mayor número de publicaciones en su área específica.

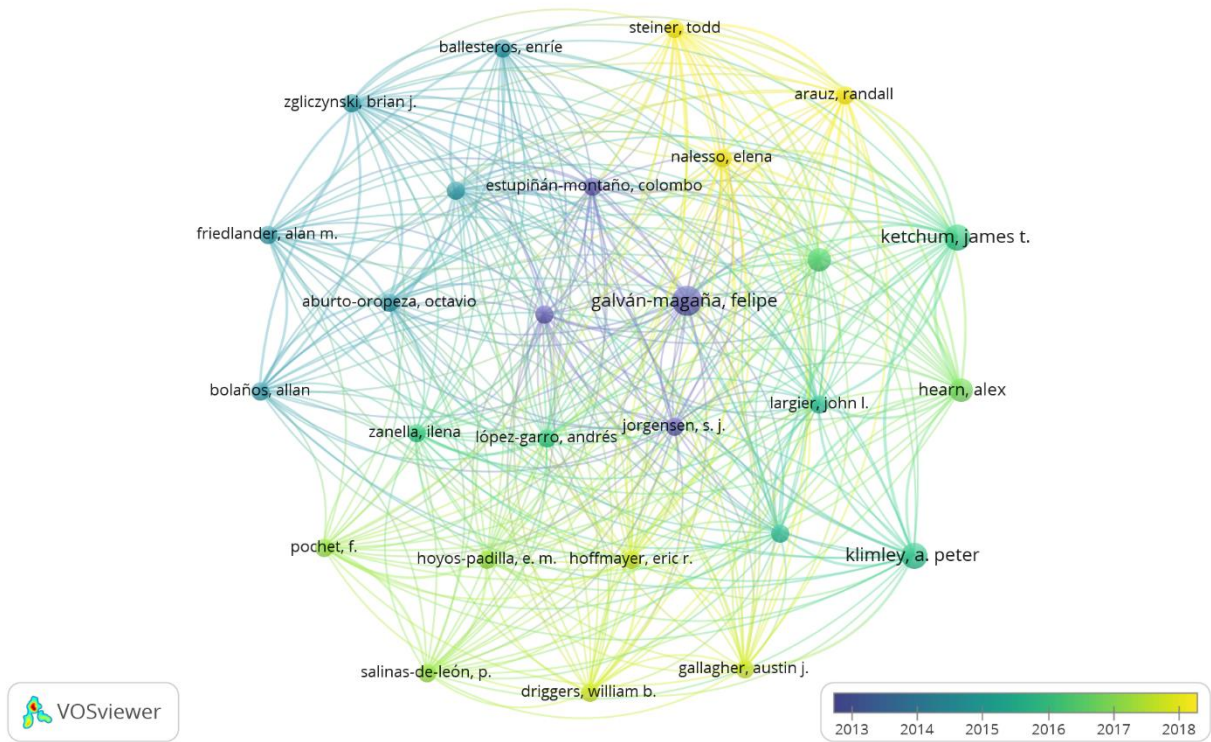


Figura 2. Red de interconexión de las publicaciones realizadas por los autores en los últimos años. Los círculos más grandes representan mayor número de publicaciones por autor y la barra de colores representa el rango de años al que pertenecen las publicaciones desde el 2013 al 2018.

2. CAPÍTULO II: ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

IMPACTO DE LA VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISTRIBUCIÓN DE *Sphyrna lewini* EN EL CORREDOR MARINO DEL PACÍFICO ESTE TROPICAL

2.1 RESUMEN

La variabilidad y cambio climático por influencia antrópica ha traído consigo alteraciones en ecosistemas marinos que a su vez han afectado la fisiología y metabolismo de especies de ectotermos como el tiburón martillo común (*Sphyrna lewini*). No obstante, se desconoce acerca del impacto que podrá tener la variabilidad climática sobre la distribución de esta especie, en especial en el Corredor Marino del Pacífico Este Tropical, considerada una zona que alberga gran biodiversidad marina. El objetivo de este proyecto fue evaluar el efecto variabilidad y cambio climático sobre la distribución oceanográfica del tiburón martillo (*Sphyrna lewini*) en el Corredor Marino del Pacífico Este Tropical, haciendo un contraste entre el escenario presente y el futuro para el 2050. Como metodología se realizó un modelo de nicho ecológico a partir del paquete KUENM del software R que usa el algoritmo de máxima entropía (MaxEnt). La modelación se hizo para el año 2050 bajo escenarios RCP2.6 y RCP8.5. Se realizaron un total de 952 modelos de los cuales solo uno cumplió con los parámetros estadísticos establecidos como óptimos. Hacia escenarios futuros, la idoneidad ambiental para *S.lewini* muestra que esta especie migraría hacia el sur en el Pacífico chileno, asociado a un posible calentamiento que tendrá la zona ecuatorial y al posible enfriamiento que tendrá la zona subtropical del Pacífico Sur para el 2050, producto de cambios en la dinámica oceanográfica.

Palabras clave: KUENM, modelación de nicho ecológico, surgencias, Bio-ORACLE, tiburón martillo, cambio climático

3. INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática ha sido un fenómeno que la tierra ha experimentado desde sus inicios, este se presenta por forzantes orbitales o forzantes naturales internas (IDEAM; UNAL, 2018). La influencia antrópica y el aumento de la emisión de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, FCHs) en los últimos años, ha traído consigo variaciones extremas en las condiciones climáticas (IPCC, 2019). Las zonas tropicales y subtropicales son las que han experimentado una mayor alteración climática en los últimos años reflejada en sequías severas, ciclones y periodos de lluvia prolongados (Flint et al., 2017). En este sentido, los océanos y sus ecosistemas costeros y pelágicos son los más vulnerable a estos cambios por la capacidad calorífica del mar, viéndose afectados por el aumento de la temperatura, y procesos asociados como la acidificación (Pistevos et al., 2015). Así como, alteraciones o mayor frecuencia/intensidad en los ciclos de variabilidad natural como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) (Navarro-Monterroza et

al., 2019). Estas condiciones han forzado a que algunas especies de organismos ectotermos cambien sus rangos de distribución geográfica, su migración, su fisiología y comportamiento como lo han reportado Luna & Cota (2013) y Soler et al., (2013).

El tiburón martillo (*Sphyrna lewini*) es considerada una especie pelágica y costera, forma “schools” o zonas de crianza cerca de ecosistemas de manglar y en áreas de poca profundidad, aunque a su vez es común verla cerca a los arrecifes y en mar abierto (Zanella et al., 2016; Coiraton & Amezcua, 2020). Su importancia ecológica radica en mantener un equilibrio dentro del ecosistema, siendo capaces de controlar el tamaño poblacional de sus presas y asegurar disponibilidad de alimento para todos los eslabones de la red trófica (Bessudo et al., 2011). Esta especie tiene una distribución global, con una alta preferencia por las zonas tropicales y subtropicales (Gallagher & Klimley, 2018). En el Océano Pacífico oriental se distribuyen desde el sur de California hasta Perú (Estupiñán-Montaño et al., 2017), siendo un “hotspot” de esta especie el Corredor Marino del Pacífico Tropical Oriental (CMAR) (Hearn et al., 2010; Chávez et al., 2020). Las características oceanográficas y topográficas de esta zona favorecen la productividad primaria y la disponibilidad de alimento gracias a procesos de surgencia (Roberts et al., 2017). Lo que convierte este lugar en un sitio clave para que el tiburón martillo se alimente, reproduzca y se refugie (Hearn et al., 2010). Por otro lado, se cree que las migraciones de esta especie tienen una estrecha relación con la temporada y las condiciones oceanográficas de la zona, donde es común ver la especie durante el fenómeno de La Niña cuando la productividad primaria es mayor y favorece la disponibilidad de alimento (Bessudo et al., 2011; Soler et al., 2013).

Sphyrna lewini es una especie de tiburón catalogada por la UICN (2019) como en peligro crítico de extinción por la sobrepesca y el aleteo que tiene lugar en el Pacífico tropical oriental (Comisión para la Cooperación Ambiental, 2017; Flores-Martínez et al., 2017). Por estas amenazas se ha incentivado la creación de áreas marinas protegidas (AMP) como el Santuario de Fauna y Flora Malpelo (ECA) en Colombia (Estupiñán-Montaño et al., 2017). A pesar de los esfuerzos la pesca industrial y artesanal siguen siendo una gran amenaza para las especies pelágicas como el tiburón martillo (Soler et al., 2013). A su vez, se cree que la variabilidad climática acoplada a procesos oceanográficos podría influenciar la oferta alimenticia para algunas especies afectando el equilibrio dinámico del ecosistema y poniendo en riesgo la supervivencia de especies como el tiburón martillo (Chavez et al., 2008; Gattuso et al., 2015).

Cambios en la química del océano (salinidad, oxígeno y temperatura) por efecto del cambio climático está generando afectaciones en diferentes grupos marinos como corales, bivalvos y condrictios (Pistevos et al., 2015; Vasquez & Tomanek, 2019). Por ejemplo, la temperatura es un factor asociado a la fisiología de *S.lewini*, al ser un organismo ectotermo resulta determinar la temperatura corporal del tiburón (Andrzejczek et al., 2018). Esto aumenta el metabolismo del organismo y le permite ser más eficiente en la caza y recorrer mayores distancias, de lo contrario si su temperatura corporal es baja, el animal tiene menores movimiento con el fin de conservar la energía (Papastamatiou et al., 2015).

Por otro lado, los cambios en la salinidad son problemáticos para la mayoría de las especies de tiburones marinos porque son estenohalino, es decir, que se adaptan a rangos específicos de salinidad (Yates et al., 2015). Con el cambio climático se espera a futuro que contribuya a un aumento de las precipitaciones asociado a reducir la salinidad y convirtiéndose en un importante estresor fisiológico para varias especies marinas que son tan dependientes de la salinidad (Ko et al., 2014). Un tema importante si se tiene en cuenta que las crías de *S. lewini* viven en zonas de manglar donde la salinidad es variable (Zanella et al., 2016). Estudios realizados en Condrictios (Pistevos et al., 2015) revelan que la disminución de oxígeno por efecto de la elevación de las temperaturas acelera procesos metabólicos como la respiración y desfavorece otros procesos como el crecimiento, la reproducción y la alimentación (Pörtner & Knust, 2007). Del mismo modo Dixson et al., (2015) considera que la acidificación de los océanos tendría un gran impacto en la capacidad olfativa de los tiburones, lo que sería un impedimento para su capacidad de búsqueda de alimento y navegación.

Si el aumento de la temperatura oceánica y los procesos de acidificación continúan, se espera a futuro que se vea afectada la fisiología y comportamiento de *S. lewini*, como se ha venido evidenciado en otros estudios con elasmobranquios (Rosa et al., 2014; Pistevos et al., 2015). Pese a la información existente relacionada con cambios en la fisiología de tiburones, aún se desconoce acerca del impacto que podrá tener el cambio climático sobre la distribución del tiburón martillo y sobre las zonas de crianza en los ecosistemas costeros (Rosa et al., 2014). En tal sentido, se hace necesario comprender cómo la interacción entre las especies y su hábitat se puede ver influenciado por el cambio climático. Para esto se puede utilizar técnicas como la modelación de distribución de especies (MDE) en función de las condiciones climáticas para lograr establecer las posibles consecuencias que tendría la especie en un futuro (Mateo et al., 2012; Encina et al., 2020).

Los MDE permiten comprender la relación entre variables climáticas con las ocurrencias de una especie. El resultado es obtener un modelo que muestra la idoneidad ambiental para que la especie pueda estar presente en un área determinada y extrapolarlo a un escenario diferente al actual, ya sea en pasado o en futuro (Leach et al., 2016). Estos modelos recopilan información sobre la distribución actual de una especie y sus variables climáticas correlacionadas, por lo tanto, es posible predecir las áreas con las condiciones ambientales ideales para que la especie de interés pueda desarrollarse (Pliscoff & Fuentes-Castillo, 2011). Su gran influencia, ha permitido tomar decisiones dentro del ámbito de la conservación y restauración de las especies (Ibarra-Montoya et al., 2012). En tal sentido, estudios orientados bajo esta premisa buscan contribuir a cumplir con el objetivo número 14 (vida submarina) de los objetivos de desarrollo sostenible. Por tal motivo, el objetivo de este proyecto fue evaluar el efecto variabilidad y cambio climático sobre la distribución geográfica del tiburón martillo (*Sphyrna lewini*) en el CMAR, haciendo un contraste entre el presente y el futuro para el 2050, considerando los escenarios pesimistas y optimistas del IPCC.

4. METODOLOGÍA

4.1 Área de estudio

El estudio se realizó en el Océano Pacífico Sur, es un área de gran importancia para la biodiversidad marina, donde proliferan diferentes especies pelágicas como tiburones, rayas y tortugas (Lezama-Ochoa et al., 2017). Junto con las islas Galápagos, islas Coco y la isla Gorgona, constituyen el corredor marino de conservación del Pacífico Oriental Tropical (POT) (Rodríguez & Giraldo, 2011). Una zona de importantes migraciones para especies de tiburones como *S.lewini* que a su vez se cree tiene una estrecha relación con la temporada y las condiciones oceanográficas de la zona (Bessudo et al., 2011).

4.2 Obtención de registros y predictores climáticos

A pesar de que el estudio se enfocó en una sola área de estudio, se trabajó con datos globales de ocurrencias de *Sphyrna lewini* obtenidos de diferentes bases de datos: Global Biodiversity Information Facility (GBIF, <https://www.gbif.org/>), Ocean Biodiversity Information System (OBIS, <https://obis.org/>) y iNaturalist que son plataformas públicas. Asimismo, fueron utilizados datos de la organización Migramar (<http://migramar.org/hi/en/>), quien nos proporcionó datos exactos de la distribución de *S.lewini* en el CMAR, que es nuestra área de interés. Esta base de datos recopila información de la distribución de tres especies de tiburones: tiburón ballena (*Rhincodon typus*), tiburón sedoso (*Carcharhinus falciformis*) y tiburón martillo (*Sphyrna lewini*) usando la técnica de telemetría, lo que convierte a este servidor como una base que proporciona datos muy confiables (Nalesso et al., 2019). Los criterios de búsqueda de la información se basaron en datos que contaran con coordenadas completas (longitud y latitud), con un espacio temporal del 2000 al 2020 y con una extensión global.

Tres escenarios de variabilidad climática global se utilizaron para los predictores ambientales. El primer escenario “actual”, uso un rango temporal del 2000 al 2020 y el “futuro”, usando condiciones modeladas para el 2050 bajo un escenario optimista (RCP 2.6) y uno pesimista (RCP 8.5). El escenario optimista muestra un aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero que conllevará al aumento de la temperatura en 1.6°C, mientras que el escenario pesimista asume un incremento de la temperatura de 4.3°C (Gonzalez-Pestana, 2018). Los predictores ambientales se obtuvieron a partir de Bio-ORACLE (<https://www.bio-oracle.org/>), plataforma que proporciona capas de información ambiental de la superficie oceánica en formato ráster con una extensión mundial y una resolución de 5 arcominutos equivalente a 9 km² aproximadamente (Tyberghein et al., 2012). Para los tres escenarios, se trabajó con ocho variables que estaban disponibles para los tres escenarios de interés y que a su vez tenían una influencia en la ecología del tiburón. No se incluyen otras variables porque se buscó comparar las mismas condiciones para los escenarios actual y a futuro. Las capas seleccionadas que suministran información de las condiciones oceanográficas fueron: temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media, temperatura limite

máxima, temperatura límite mínima, temperatura rango, salinidad media y velocidad de corriente media.

4.3 Modelado de nicho ecológico

Se utilizó el paquete KUENM (Cobos et al., 2018) del software R 3.6.3 para realizar los modelos predictivos actual y hacia el futuro. Este paquete permite evaluar los modelos con los parámetros escogidos libremente por el investigador de forma automatizada en tres etapas: la calibración, creación y evaluación del modelo final; así como un análisis de riesgo de extrapolación. Los modelos se crean gracias a que el paquete KUENM utiliza al algoritmo de Máxima entropía (MaxEnt), el cual permite seleccionar diferentes parámetros como: el multiplicador de regularización, clases de entidad y los predictores ambientales (Cobos et al., 2018).

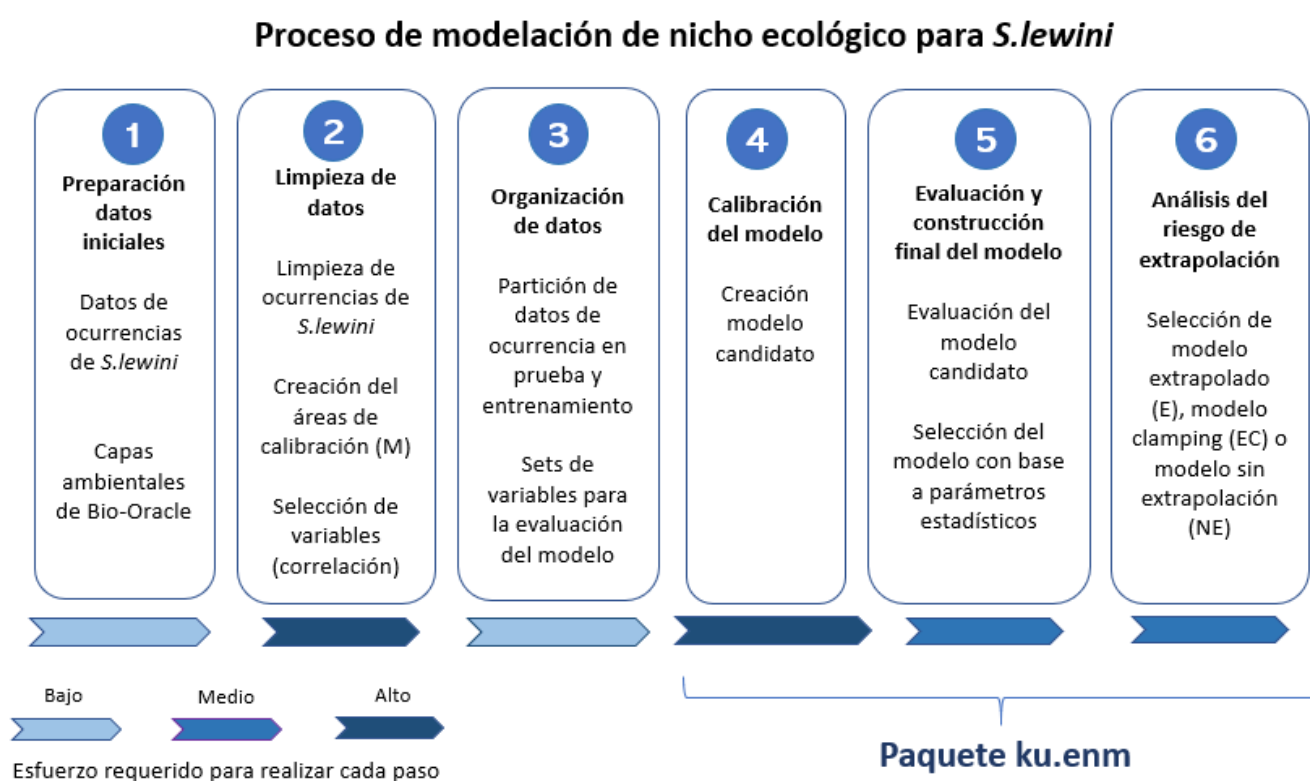


Figura 1. Proceso de modelación de nicho ecológico. Modificado de Cobos et al., (2018).

MaxEnt es uno de los algoritmos más utilizados en la modelización de distribución potencial de especies dentro del mundo de los Sistemas de Información Geográfica, utiliza datos de presencia o pseudopresencia y puede ser usado para predecir distribuciones futuras y en el pasado (Varela et al., 2014). Este algoritmo se caracteriza por tener un aprendizaje automático y consta de dos componentes: la entropía, donde el modelo se calibra para encontrar la distribución más cercana al uniforme en toda la región de estudio; y las restricciones, son las reglas que limitan la distribución prevista (Guillera-

Arroita et al., 2014). El proceso de modelación de nicho ecológico se dividió en varias etapas (Figura 1).

4.4 Tratamiento de ocurrencias

Se creó un código de limpieza (Ver código en anexos 1) donde las coordenadas obtenidas a partir de las bases de datos se sometieron a un proceso de filtrado con el fin de corroborar la calidad de los datos. Este es un paso muy importante que se debe realizar para evitar incluir información errónea en el modelo, como por ejemplo coordenadas que se encuentran sobre el continente, coordenadas duplicadas, incompletas o repetidas. A continuación, se creó un script de trabajo donde se llevaron a cabo varios procesos: se realizó un Thin espacial con el fin de disminuir en número de coordenadas en una zona específica. Este Thin se realizó de 50km que es la distancia que pueden llegar a recorrer los tiburones en un día (Ketchum et al., 2014; Nalesso et al., 2019).

4.5 Tratamiento de información ambiental

Se realizó un área de calibración (M) donde las capas ambientales se cortaron al tamaño de buffer (600 km), que es la distancia que un ejemplar de *S.lewini* puede recorrer en un mes (Bessudo et al., 2011; Nalesso et al., 2019). Se continuo con un análisis de correlación de las variables que se estableció realizando una prueba de multicolinealidad mediante un análisis de factor de inflación de la varianza (VIF) y un análisis de correlación de Pearson en donde valores < 0.8 (Figura 3, ver anexos) ayudaban a identificar predictores no correlacionados entre sí ya que la selección de variables se estableció teniendo en cuenta las variables que no presentaban una fuerte correlación entre ellas y a su vez que tuvieran una influencia sobre la especie de interés. Lo anterior concluyó en la creación de ocho sets de variables (Tabla 1). Finalmente, se hizo una división de datos de forma aleatoria en entrenamiento y pruebas con el fin de entrenar el modelo para que lograra realizar una mejor predicción. Los datos de entrenamiento se utilizan para realizar la calibración del modelo. Por otro lado, los valores de prueba se usan para realizar la evaluación del modelo (Figura 2, ver anexos).

Tabla 1. Sets de variables utilizados como predictores ambientales para realizar el modelo

Sets	Variables
Set1	Incluye todas las variables: temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media, temperatura limite máxima, temperatura limite mínima, temperatura rango, salinidad media y velocidad de corriente media
Set2	Temperatura limite máxima, salinidad media y velocidad de corriente media
Set3	Temperatura limite mínima, salinidad media y velocidad de corriente media
Set4	Temperatura máxima, salinidad media y velocidad de corriente media

Set5	Temperatura media, salinidad media y velocidad de corriente media
Set6	Temperatura mínima, salinidad media y velocidad de corriente media
Set7	Temperatura rango, salinidad media y velocidad de corriente media
Set8	Temperatura limite máxima, Temperatura rango, salinidad media y velocidad de corriente media

4.6 Calibración del modelo

La calibración del modelo se realizó usando el paquete de KUENM donde se aplicaron los multiplicadores de regularización desde 0.1 al 10, las clases de entidad lineal (L), cuadrático (Q), producto (P) y las combinaciones posibles entre ellas y se utilizaron 8 sets diferentes de variables (Tabla 2), para los predictores ambientales.

Tabla 2. Parámetros escogidos para la creación de los modelos candidatos.

Parámetros	
Multiplicadores de regularización	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10
Clases de entidad	l,q,p,lq,lp,qp,lpq
Sets de predictores	Set1, Set2, Set3, Set4, Set5, Set6, Set7, Set8

4.7 Evaluación y selección del modelo final

La selección del modelo final se basó en tres criterios principales: la característica operativa del receptor (ROC) que representa la significancia del modelo, donde se esperan obtener valores cercanos a cero; la tasa de omisión que representa el desempeño o el rendimiento del modelo, donde se espera obtener valores por debajo del 5% y el Delta del criterio de información de Akaike (Delta_AICc) que representa la complejidad o simplicidad del modelo, donde se espera obtener valores cercanos a cero (Cobos et al., 2019).

La curva característica del receptor representa la proporción de falsos positivos y verdaderos positivos, donde se grafica la sensibilidad que representa las presencias conocidas (verdaderos positivos) y la especificidad que representa las ausencias predichas incorrectamente (falsos positivos) (Srivastava et al., 2018). Los verdaderos positivos se presentan cuando el píxel cae sobre un punto donde hay una alta probabilidad de encontrar la especie, mientras que los falsos negativos se dan cuando el píxel cae sobre un área donde la probabilidad de encontrar la especie es muy baja. Por lo tanto, siempre se espera que los valores de la ROC_{parcial} sean cercanos a cero y el área bajo la curva (AUC) del receptor este cercana a uno.

4.8 Análisis de extrapolación

El análisis de extrapolación permite realizar una predicción sobre el comportamiento que tendrán las variables ambientales y ocurrencias de la especie de interés en el espacio geográfico, ya sea un comportamiento constante o variable (Bentlage et al., 2013). Para tal fin, se realizó una gráfica tridimensional que incluyó las variables más relevantes para el modelo, junto con los datos de ocurrencia de la especie y el área de calibración. Todos estos parámetros se compararon para realizar un análisis espacial de la nube de puntos de ocurrencias y el área de calibración, observando la distribución de puntos se determinó que modelo se debía escoger: modelo extrapolado, no extrapolado o clamping (Owens et al., 2013).

5. RESULTADOS

De las bases de datos de obtuvieron inicialmente 4433 coordenadas que al sufrir el proceso de limpieza se redujo un 65% a 1546 ocurrencias con las que se realizó la modelación. Se obtuvo un total de 952 modelos, de los cuales 129 fueron estadísticamente significativos (Tabla 3) y donde el modelo M_0.2_F_lqp_Set4 fue seleccionado ya que cumplía los criterios de selección estadísticos (Tabla 4). En este sentido, el modelo que uso el multiplicador de regularización 0.2, con la combinación de las clases de entidad lineal, cuadrático y producto, usando el set de variables cuatro, que incluyo las variables de temperatura máxima, salinidad media y velocidad de corriente media fue el mejor.

Tabla 3. Estadísticas generales de modelos que cumplieron distintos criterios.

Criterio	Número de Modelos
Todos los modelos candidatos	952
Modelos estadísticamente significativos	129
Modelos que cumplen los criterios de tasa de omisión	114
Modelos que cumplen con los criterios de AICc	2
Modelos estadísticamente significativos que cumplen los criterios de tasa de omisión	18
Modelos estadísticamente significativos que cumplen con los criterios AICc	2
Modelos estadísticamente significativos que cumplen con la tasa de omisión y los criterios AICc	1

Tabla 4. Estadísticas de desempeño para los mejores modelos seleccionados según la significancia de los parámetros estadísticos.

Modelo	ROC_Parcial	Tasa de omisión del 5%	Delta_AICc	Número de parámetros
M_0.2_F_lqp_Set4	0.033	0.041	0	8

La figura 4, muestra la curva ROC donde se evidencia una mayor tendencia de la curva hacia valores altos de sensibilidad, lo que se traduce en una mayor proporción de verdaderos positivos, es decir, presencias conocidas. De tal manera podemos inferir que el modelo es capaz de diferenciar con buena precisión entre las presencias y las ausencias (Peterson et al., 2008). Por otro lado, el análisis tridimensional (Figura 5) nos muestra que los puntos de ocurrencias están distribuidos sobre los puntos de la zona de calibración, es decir, que se limitan solo a estar dentro del área. Caso contrario, si hubiera puntos que estuvieran fuera del área de calibración sí sería pertinente pensar en extrapolar o realizar un clamping. Como no es el caso, se escogió el modelo que no está extrapolado, que nos brinda información solo a partir de las variables y datos incluidos.

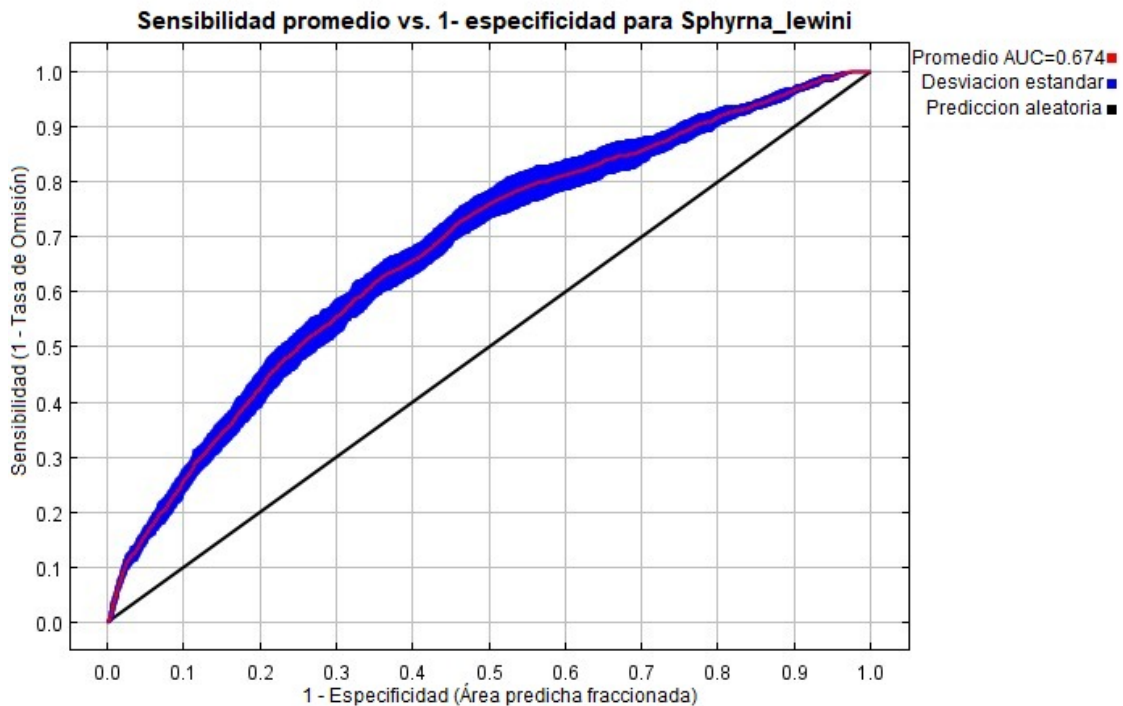


Figura 4. Curva de característica operativa del receptor (ROC) para los datos de distribución de *Sphyrna lewini*. La línea roja representa la media del área bajo la curva y los colores azules el intervalo de confianza para los valores de esa media.

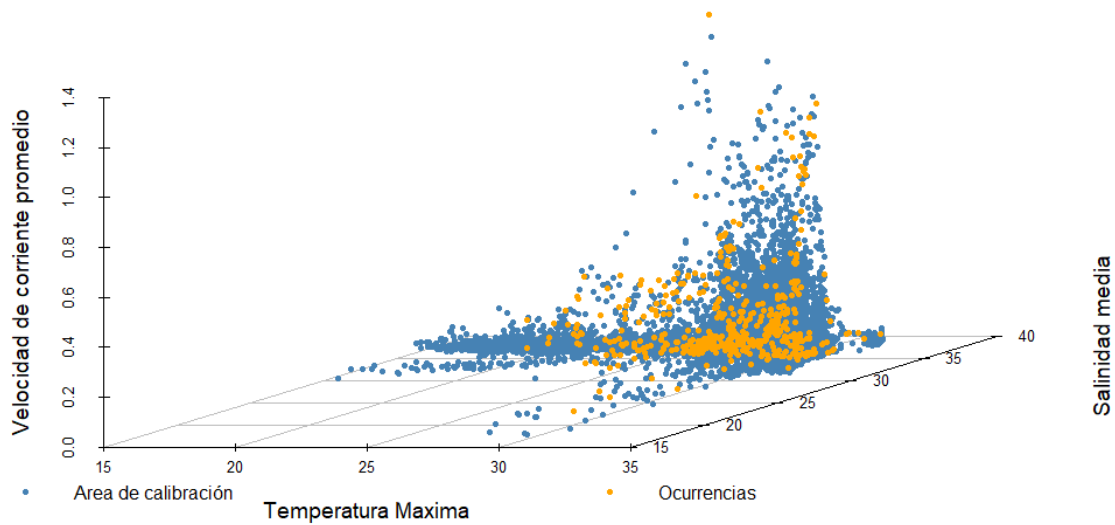


Figura 5. Análisis tridimensional del contraste de la nube de puntos de ocurrencias (puntos naranjas) con respecto a la nube de puntos del área de calibración (puntos azules).

6. DISCUSIÓN

Al momento de realizar una modelación de nicho ecológico, es indispensable tener en cuenta los factores que determinan la distribución de una especie (Soberón et al., 2017). Como se sabe las condiciones bióticas en las que se incluye la competencia o la depredación no son las únicas variables que limitan la distribución de las especies (Schlaff et al., 2014). Para nuestro caso, las variables abióticas como la temperatura, salinidad y velocidad de corriente también son factores para tener en cuenta cuando se quiere comprender los patrones de distribución y movimiento de elasmobranquios (Bernal et al., 2012).

6.1 Curvas de respuesta

Las curvas de respuesta son ideales para comprender la manera en la que una o varias variables ambientales se relacionan con nuestra especie de interés. Para nuestra modelación se determinó que las variables más importantes para el modelo seleccionado fueron velocidad de corriente media, salinidad media y temperatura máxima. Para el caso de la velocidad de corriente, esta variable resulta asociarse fuertemente con procesos de forrajeo de algunas especies (Cartamil et al., 2011). Según las curvas de respuestas para la velocidad de corriente, el modelo sugiere un rango ideal entre valores de 0.2 y 1.4 m s⁻¹, siendo 0.8 m s⁻¹ el valor óptimo para la especie (Figura 6A), consistente con lo que se esperaría para esta especie. Los tiburones martillo suelen migrar a zonas donde las velocidades de corrientes son rápidas para tener una mayor probabilidad de encontrar alimento, lo que sucede en áreas de mar abierto (Ketchum et al., 2014). Asimismo, usar las corrientes les permite disminuir costos energéticos y a su vez evitar predadores (Campbell et al., 2012). Además, suelen habitar ecosistemas de arrecife donde las

velocidades de corriente son menores para refugiarse y conservar energía (Zanella et al., 2016).

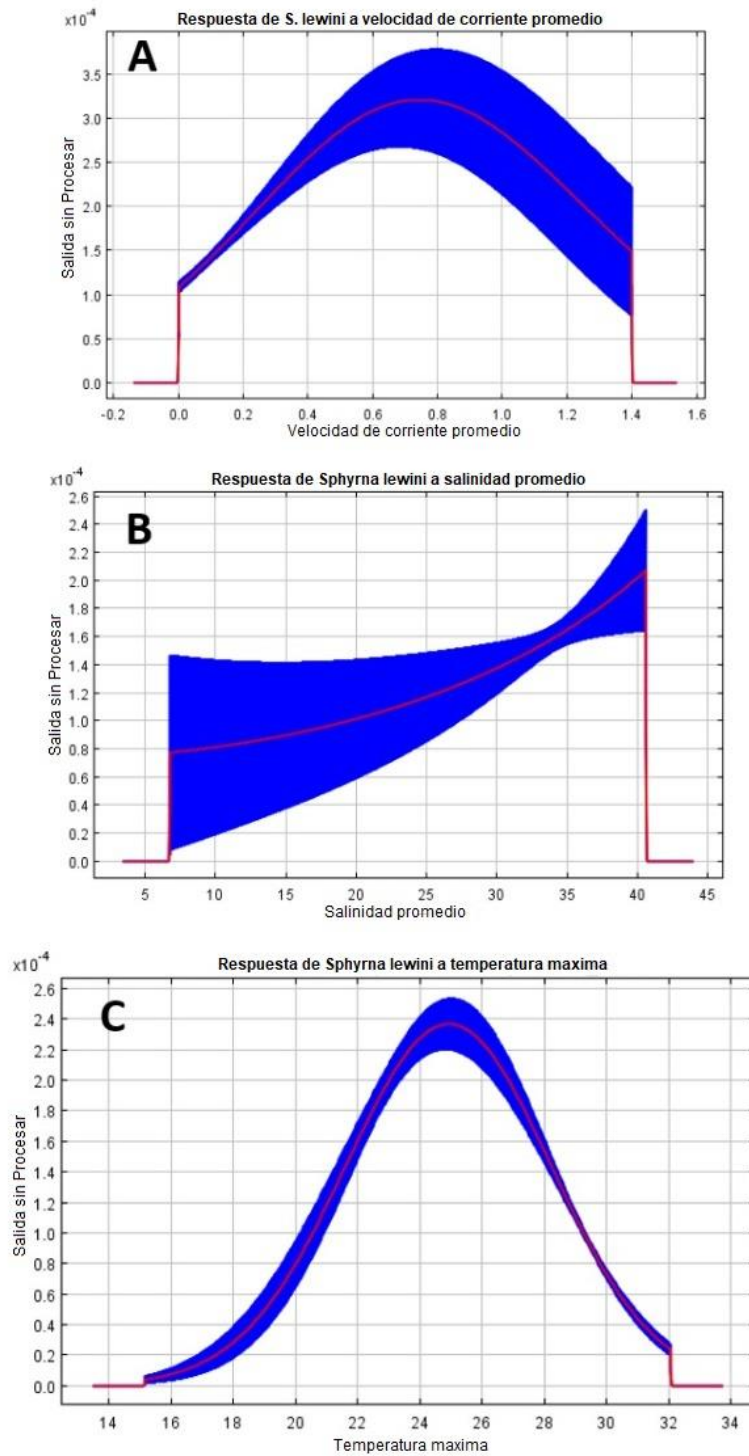


Figura 6. Curvas de respuesta para las variables seleccionadas. A) Respuesta de *Sphyrna lewini* a la velocidad de corriente. B) Respuesta de *Sphyrna lewini* a la salinidad media. C)

Respuesta de *Sphyrna lewini* a la temperatura máxima. Las líneas rojas representan la media de los datos y las franjas azules el intervalo de confianza para esos valores.

Las curvas de salinidad sugieren que el rango ideal para nuestra especie se encuentra entre 30 y 35 PSS (Practical salinity scale), que es la zona de la gráfica que muestra un intervalo de confianza reducido (Figura 6B). Este rango concuerda con la salinidad reportada para el océano Pacífico que es de 34 PSS (Kao & Lagerloef, 2015). Por consiguiente, estos valores se encuentran dentro del rango de tolerancia de *S.lewini* que va de 28 a 36 PSS (Cuevas-Gómez et al., 2020). No obstante, las crías de *S.lewini* que habitan zonas costeras prefieren concentraciones de salinidad mucho más bajas, lo que explica su preferencia por ecosistemas costeros como los de manglares y estuarios (Marie et al., 2017). La preferencia por rangos de salinidad específica convierte a esta especie de tiburón en estenohalino (Yates et al., 2015), es decir, que es una especie que busca permanecer dentro de rangos que puedan tolerar para reducir gastos energéticos en procesos como la osmorregulación (Martin et al., 2012). Lo anterior demuestra como la variable de salinidad influencia en la distribución y abundancia de especies de elasmobranquios, como previamente ha sido reportado por Poulakis et al., (2011) y Francis (2013).

La temperatura, por otro lado, es una variable de gran influencia sobre organismos ectotermos como los elasmobranquios (Bernal *et al.*, 2012), múltiples estudios han demostrado su estrecha relación y los efectos que puede llegar a traer los cambios de esta variable sobre tiburones y rayas (Hoffmayer et al., 2013; Thums et al., 2013; Ketchum et al., 2014; Rivas et al., 2018). La curva de respuesta de la temperatura que arroja el modelo muestra que la especie tiene un rango de tolerancia entre los 15 y 32°C (Figura 6C). Según la zona en la que se distribuye *S.lewini* se ha reportado que tolera rangos de entre 23 a 26°C en Islas Galápagos (Ketchum et al., 2014), de entre 14 y 23°C en Australia (Francis, 2016), y de entre 18 y 31°C en Golfo de California (Salomón-Aguilar et al., 2009). Aunque se considera que el rango óptimo para la especie esta entre 26 y 30°C (Cuevas-Gómez et al., 2020), la curva normal de nuestro modelo sugiere que el valor máximo de idoneidad de temperatura para la especie es de 25°C.

Las estrategias que han optado estos organismos frente a los cambios de temperatura son i) adaptarse a las nuevas condiciones para aprovechar la disponibilidad de alimento y evitar depredadores (Fangue & Bennett, 2003) o ii) cambiar sus patrones de movimiento y distribución en búsqueda de los rangos de temperatura ideales (Schlaff et al., 2014). No obstante, se debe tener en cuenta que los cambios de movimientos de los elasmobranquios por efecto de la temperatura también se pueden asociar a preferencias de forrajeo o de reproducción (Speed et al., 2012; Thums et al., 2013). Por ejemplo, es habitual encontrar agrupaciones de hembras de *S.lewini* en temporadas cálidas cerca de montes submarinos o áreas costeras de Isla Cocos y Malpelo (Soler et al., 2013). Las temperaturas altas incrementan el desarrollo de las crías y disminuye los períodos de gestación (Salinas de León et al., 2017). Además, influencia el movimiento y distribución de elasmobranquios (Schlaff et al., 2014). De esta manera se determina que la temperatura puede favorecer los procesos de reproducción de la especie, pero puede afectar aspectos metabólicos y

fisiológicos como lo ha reportado Bernal et al., (2012), quien considera que la tasa metabólica muestra una relación directamente proporcional con esta variable.

6.2 Mapas de idoneidad ambiental para *S. lewini*

Los modelos para las condiciones futuras reflejan la idoneidad ambiental que puede favorecer o desfavorecer la presencia de nuestra especie, en ciertas regiones. En la Figura 7, nuestros resultados evidencian que a medida que se contrasta el presente con los escenarios a futuro (RCP 2.6 y 8.5), la zona de mayor idoneidad para la especie se va desplazando más hacia zonas australes como por ejemplo al frente de las costas de Chile. Es decir, hay aumento de idoneidad en zonas donde no es común verla y una disminución de idoneidad ambiental donde hoy existen registros como en el CMAR. Por lo tanto, se podría esperar que la gran biodiversidad que alberga esta zona también se vea afectada por los cambios ambientales que allí se podrían presentar. Condiciones que podrían favorecer a algunas especies o desfavorecer a otras como a *S. lewini* (Chavez et al., 2008).

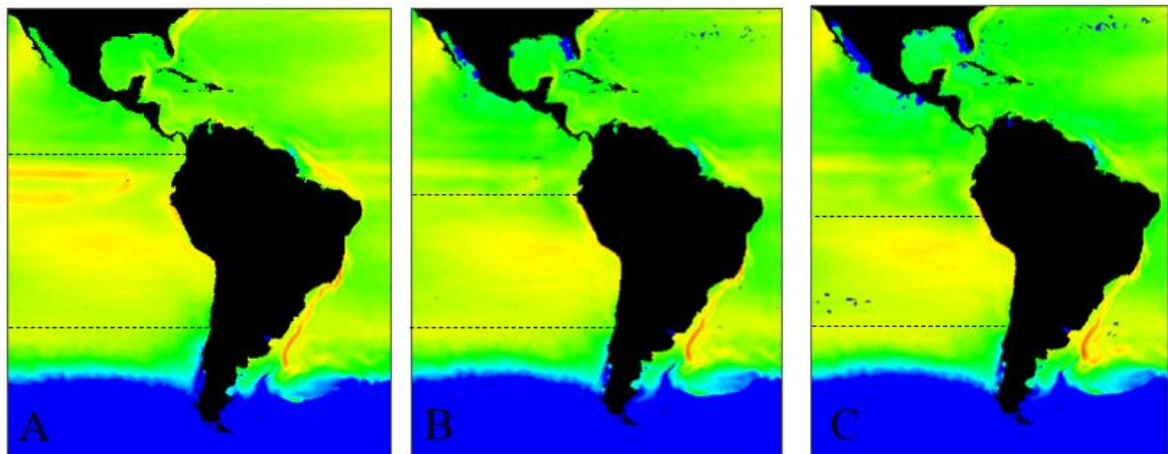


Figura 7. Mapas de distribución de *Sphyrna lewini* usando los predictores ambientales de velocidad de corriente, salinidad media y temperatura máxima. A) Mapa predictor de la distribución para el presente. B) Mapa predictor de la distribución para el 2050 bajo un escenario RCP 2.6. C) Mapa predictor de la distribución para el 2050 bajo un escenario RCP 8.5. Los colores cálidos representan una mayor idoneidad ambiental para la especie en esa área y colores fríos representan una menor idoneidad ambiental. Las líneas punteadas en negro representan el posible cambio de rango de distribución de la especie según la idoneidad ambiental.

El este del océano Pacífico donde se encuentra el sistema de corrientes de Humboldt, representa una zona de suma importancia para la biodiversidad marina gracias a los procesos de surgencia que dan lugar a un mayor afloramiento de la productividad primaria (Oyarzún & Brierley, 2019). Allí la temperatura oscila entre 16 a 25°C (Chavez et al., 2008), estando dentro del rango de tolerancia de nuestra especie según el modelo obtenido y según lo reportado por Ketchum et al., (2014) y Francis (2016) (Figura 5). No obstante, el desplazamiento hacia el sur que refleja nuestro modelo se podría asociar al

aumento de la temperatura superficial en la zona ecuatorial, producto del calentamiento global bajo ambos escenarios.

Según Zheng et al., (2016) y Fosu et al., (2020) la temperatura superficial del océano (SST) tenderá a aumentar para la zona ecuatorial del océano Pacífico, debido al debilitamiento de la circulación de Walker y la estratificación del océano. Con el aumento de la temperatura en especial en las zonas costeras, se podrá genera un cambio en la termoclina y una mayor estratificación que generará menor disponibilidad de nutrientes y un debilitamiento de las surgencias subsuperficiales, por debajo de los 100m. Lo anterior podría tener impactos directos sobre la ecología de especies asociados a la zona (Aravena et al., 2014; Oyarzún & Brierley, 2019). La SST sería tan elevada que la especie no podría tolerarla y eso haría que buscara otros mecanismos de adaptación, ya sea aumentar los movimientos verticales para termorregular, donde los tiburones tienden a nadar a zonas más profundas cuando las temperaturas son muy elevadas en la zona superficial (Friedlander et al., 2012; Ketchum et al., 2014) o cambiar sus rangos de distribución a zonas con mejores condiciones (Schlaff et al., 2014), como según nuestros resultados evidencian, hacia zonas australes.

Sin embargo, otros autores consideran que las condiciones del cambio climático favorecerán los vientos y los sistemas de corriente, lo que permitirá el incremento de las surgencias y por lo tanto el afloramiento de la productividad primaria, aportando las condiciones ideales para *S.lewini* (England et al., 2014; McGregor et al., 2014; Bakun et al., 2015; Xiu et al., 2018). Algunos modelos climático bajo escenario de cambio climático sugieren que en la zona sur del Pacífico justo al frente de la costa de Chile, los vientos serán mucho más fuertes debido al desplazamiento del anticiclón del Pacífico Sur (Belmadani et al., 2014; Flores-Aqueveque et al., 2020). Esto favorecerá el enfriamiento de la SST y a su vez favorecer el aumento de la salinidad debido a la disminución de precipitaciones (Xiu et al., 2018). Además, se considera que para finales de este siglo las surgencias serán mucho más predominantes (Wang et al., 2015), mostrando unas condiciones ideales para la biodiversidad de la zona, favoreciendo el establecimiento de diferentes especies pelágicas como *S.lewini* (Chavez et al., 2008).

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda incluir variables adicionales como oxígeno disuelto o pH que tienen una fuerte influencia sobre la ecología de la especie. Incluirlos podría dar indicios sobre como el cambio climático podría afectar la fisiología de *S.lewini* en un futuro. Todo lo anterior teniendo en cuenta que las variables deben estar presentes para los escenarios que se quieren comparar. Es importante destacar que la disponibilidad de información de los datos de ocurrencias es amplia, pero nos todas las bases de datos presentan información de calidad, esto tomando como referencia el proceso de limpieza permitió eliminar una gran cantidad de datos, cerca del 65%. Además, que existe un sesgo espacial en la disponibilidad de información que pudo limitar los resultados del estudio, debido a que hay mayores datos en países como Estados Unidos y Australia en comparación del resto del mundo y el área de estudio. Se requiere seguir obteniendo ocurrencia de *S.lewini* para incrementar la disponibilidad de información de calidad y poder seguir realizando

estudios relacionados. Esto permitiría implementar estrategias de conservación de la especie o medidas de protección dentro del CMAR u otras áreas de importancia biológica como las AMP.

8. CONCLUSIONES

La ejecución de la modelación usando el paquete de KUENM nos permitió crear 952 modelos candidatos de los cuales se obtuvo solo un modelo estadísticamente significativo teniendo en cuenta los parámetros de ROC, tasa de omisión y el criterio de información de Arkaike. El modelo seleccionado fue M_0.2_F_lqp_Set4, es decir, el modelo que uso el multiplicador de regularización 0.2, con la combinación de las clases de entidad lineal, cuadrático y producto, usando el set de variables cuatro que incluyo las variables de temperatura máxima, salinidad media y velocidad de corriente media.

Las curvas de respuesta para las tres variables logran estimar valores que se encuentran dentro de los tolerables para la especie y para la zona en la que se distribuye. Los valores óptimos que estima el modelo son de 26 °C para la temperatura, 34 a 45 PSS para la salinidad y 0.8 m s⁻¹ para la velocidad de corriente. Lo que demuestra que el modelo logro hacer una muy buena predicción de las condiciones ambientales ideales para *S.lewini* al compararlas con las reportadas por diferentes autores (Campbell et al., 2012; Cuevas-Gómez et al., 2020). Con respecto a la predicciones hacia el futuro, para el escenario RCP 2.6 y RCP 8.5, se evidencia que la idoneidad ambiental para *S.leiwini* se desplaza hacia el sur probablemente por un aumento de la temperatura en la zona de CMAR (Zheng et al., 2016; Fosu et al., 2020) pero un mayor enfriamiento en la zona central del Pacífico chileno (Bakun et al., 2015; Xiu et al., 2018). Por lo tanto, se determina que la idoneidad ambiental para el establecimiento de *S.lewini* se asocia a temperaturas más frías de entre los 20 y 25°C, asociado a una mayor salinidad y un mayor afloramiento de la productividad primaria (Chavez et al., 2008; Xiu et al., 2018).

Por otro lado, se debe reconocer que al momento de obtener los datos de ocurrencia de la especie de interés existe un sesgo espacial. Como se evidencia en la Figura 2 y 8 (ver anexos), hay una mayor disponibilidad de datos en países como Australia y en la zona Este de Estados Unidos a comparación del resto del mundo. En estos países la mayor disponibilidad de información que se puede relacionar a un mayor número de investigaciones asociadas a ecosistemas marinos. Por lo tanto, se debe tener en cuenta que el esfuerzo de muestreo para la realización del modelo fue diferente en todas las áreas en que existían datos de ocurrencia.

Los resultados aquí mostrados solo son un acercamiento hacia la idoneidad ambiental que pueden favorecer el establecimiento o aumento en la distribución de *S.lewini*. Se recomienda seguir realizando este tipo de proyectos donde además se puedan incluir otras variables como pH u oxígeno disuelto como variables que se relacionan estrechamente con la fisiología de *S.lewini* y que además son de relevancia para el área de estudio que se trabajó.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Andrzejczek, S., Gleiss, A. C., Jordan, L. K., Pattiaratchi, C. B., Howey, L. A., Brooks, E. J., & Meekan, M. G. (2018). Temperature and the vertical movements of oceanic whitetip sharks, *Carcharhinus longimanus*. *Scientific reports*, 8(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26485-3>.
2. Bakun, A., Black, B. A., Bograd, S. J., García-Reyes, M., Miller, A. J., Rykaczewski, R. R., & Sydeman, W. J. (2015). Anticipated Effects of Climate Change on Coastal Upwelling Ecosystems. *Current Climate Change Reports*, 1(2), 85–93. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0008-4>
3. Benthage, B., Peterson, A. T., Barve, N., & Cartwright, P. (2013). Plumbing the depths: extending ecological niche modelling and species distribution modelling in three dimensions. *Global Ecology and Biogeography*, 22(8), 952-961. <https://doi.org/10.1111/geb.12049>
4. Belmadani, A., Echevin, V., Codron, F., Takahashi, K., & Junquas, C. (2014). What dynamics drive future wind scenarios for coastal upwelling off Peru and Chile?. *Climate dynamics*, 43(7-8), 1893-1914. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-2015-2>
5. Bernal, D., Carlson, J. K., Goldman, K. J., & Lowe, C. G. (2012). Energetics, Metabolism, and Endothermy in Sharks and Rays. *Biology of Sharks and Their Relatives*, Carrier, J.C, Musick, J.A., Heithaus, M.C. (Eds.), *Biology of Sharks and their Relatives* (second ed.), Taylor and Francis Group, LLC, Boca Raton, FL, pp. 211-237.
6. Bessudo, S., Soler, G. A., Klimley, A. P., Ketchum, J. T., Hearn, A., & Arauz, R. (2011). Residency of the scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) at Malpelo Island and evidence of migration to other islands in the Eastern Tropical Pacific. *Environmental Biology of Fishes*, 91(2), 165-176. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68iS1.41202>
7. Campbell, H. A., Hewitt, M., Watts, M. E., Peverell, S., & Franklin, C. E. (2012). Short-and long-term movement patterns in the freshwater whipray (*Himantura dalyensis*) determined by the signal processing of passive acoustic telemetry data. *Marine and Freshwater Research*, 63(4), 341-350. <https://doi.org/10.1071/MF11229>
8. Cartamil, D., Wegner, N. C., Aalbers, S., Sepulveda, C. A., Baquero, A., & Graham, J. B. (2010). Diel movement patterns and habitat preferences of the common thresher shark (*Alopias vulpinus*) in the Southern California Bight. *Marine and Freshwater Research*, 61(5), 596-604. <https://doi.org/10.1071/MF09153>
9. Chávez, E. J., Arauz, R., Hearn, A., Nalesso, E., & Steiner, T. (2020). Asociación de tiburones con el Monte Submarino Las Gemelas y primera evidencia de conectividad con la Isla del Coco, Pacífico de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 68(S1), S320-S329. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68iS1.41202>
10. Chavez, F. P., Bertrand, A., Guevara-Carrasco, R., Soler, P., & Csirke, J. (2008). The northern Humboldt Current System: Brief history, present status and a view towards the future. *Progress in Oceanography*, 79(2–4), 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.012>

11. Cobos, M. E., Peterson, A. T., Barve, N., & Osorio-Olvera, L. (2019). kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 7, e6281. <https://doi.org/10.7717/peerj.6281>
12. Coiraton, C., & Amezcua, F. (2020). In utero elemental tags in vertebrae of the scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini* reveal migration patterns of pregnant females. *Scientific Reports*, 10(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58735-8>
13. Comisión para la Cooperación Ambiental (2017). Plan de acción de América del Norte para un comercio sustentable de especies de tiburón. <http://www3.cec.org/islandora/es/item/11714-sustainable-trade-in-sharks-action-plan-north-america-es.pdf> [Consultado el 18 de octubre de 2019].
14. Dixon, D. L., Jennings, A. R., Atema, J., & Munday, P. L. (2015). Odor tracking in sharks is reduced under future ocean acidification conditions. *Global Change Biology*, 21, 1454–1462. <https://doi.org/10.1111/gcb.12678>
15. Encina, F. M. M., González, J. M., & Paredes, J. C. (2020). Distribución actual y potencial de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins bajo dos escenarios de cambio climático. *Madera y bosques*, 26(2), 2. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2622002>
16. England, M. H., McGregor, S., Spence, P., Meehl, G. A., Timmermann, A., Cai, W., ... & Santoso, A. (2014). Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nature climate change*, 4(3), 222–227. <https://doi.org/10.1038/nclimate2106>
17. Estupiñán-Montaña, C., Galván-Magaña, F., Tamburín, E., Sánchez-González, A., Villalobos-Ramírez, D. J., Murillo-Bohórquez, N., ... & Estupiñán-Ortiz, J. F. (2017). Trophic inference in two sympatric sharks, *Sphyrna lewini* and *Carcharhinus falciformis* (elasmobranchii: carcharhiniformes), based on stable isotope analysis at Malpelo Island, Colombia. *Acta Ichthyologica et Piscatoria*, 47(4), 357–364. <https://doi.org/10.3750/AIEP/02177>
18. Figueira, N. A., & Bennett, W. A. (2003). Thermal tolerance responses of laboratory-acclimated and seasonally acclimatized Atlantic stingray, *Dasyatis sabina*. *Copeia*, 2003(2), 315–325. [https://doi.org/10.1643/0045-8511\(2003\)003\[0315:TTROLA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1643/0045-8511(2003)003[0315:TTROLA]2.0.CO;2)
19. Flint, J., Flint, M., Limpus, C. J., & Mills, P. C. (2017). The impact of environmental factors on marine turtle stranding rates. *PloS one*, 12(8), e0182548. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182548>
20. Flores-Aqueveque, V., Rojas, M., Aguirre, C., Arias, P.A., González, C. (2020). South Pacific Subtropical High from the late Holocene to the end of the 21st century: insights from climate proxies and general circulation models. *Clim Past* 16(1):79–99. <https://doi.org/10.5194/cp-16-79-2020>
21. Flores-Martínez, I. A., Torres-Rojas, Y. E., Galván-Magaña, F., & Ramos-Miranda, J. (2017). Diet comparison between silky sharks (*Carcharhinus falciformis*) and scalloped hammerhead sharks (*Sphyrna lewini*) off the south-west coast of Mexico. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 97(2), 337–345. <https://doi.org/10.1017/S0025315416000424>

22. Francis, M. P. (2013). Temporal and spatial patterns of habitat use by juveniles of a small coastal shark (*Mustelus lenticulatus*) in an estuarine nursery. *PloS one*, 8(2), e57021. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057021>
23. Francis, M. P. (2016). Distribution, habitat and movement of juvenile smooth hammerhead sharks (*Sphyrna zygaena*) in northern New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 50(4), 506–525. <https://doi.org/10.1080/00288330.2016.1171244>
24. Fosu, B., He, J., & Liguori, G. (2020). Equatorial Pacific Warming Attenuated by SST Warming Patterns in the Tropical Atlantic and Indian Oceans. *Geophysical Research Letters*, 47(18), 0–2. <https://doi.org/10.1029/2020GL088231>
25. Gallagher, A. J., & Klimley, A. P. (2018). The biology and conservation status of the large hammerhead shark complex: the great, scalloped, and smooth hammerheads. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 28(4), 777–794. <https://doi.org/10.1007/s11160-018-9530-5>
26. Gattuso, J. P., Magnan, A., Billé, R., Cheung, W. W. L., Howes, E. L., Joos, F., Allemand, D., Bopp, L., Cooley, S. R., Eakin, C. M., Hoegh-Guldberg, O., Kelly, R. P., Pörtner, H. O., Rogers, A. D., Baxter, J. M., Laffoley, D., Osborn, D., Rankovic, A., Rochette, J., ... Turley, C. (2015). Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios. *Science*, 349(6243). <https://doi.org/10.1126/science.aac4722>
27. Gonzalez-Pestana, A. (2018). Habitat Suitability of Juvenile Smooth Hammerhead Shark (*Sphyrna zygaena*) off northern Peru [master's thesis]. James Cook University, Australia. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21919.00167>
28. Guillera-Aroita, G., Lahoz-Monfort, J.J., Elith, J. (2014). Maxent is not a presence–absence method: a comment on Thibaud et al. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(11), 1192–1197. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12252>
29. Hearn, A., Ketchum, J., Klimley, A. P., Espinoza, E., & Peñaherrera, C. (2010). Hotspots within hotspots? Hammerhead shark movements around Wolf Island, Galapagos Marine Reserve. *Marine Biology*, 157(9), 1899–1915. <https://doi.org/10.1007/s00227-010-1460-2>
30. Hoffmayer, E. R., Franks, J. S., Driggers, W. B., & Howey, P. W. (2013). Diel vertical movements of a scalloped hammerhead, *Sphyrna lewini*, in the northern Gulf of Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 89(2), 551–557. <https://doi.org/10.5343/bms.2012.1048>
31. Ibarra-Montoya, J. L., Rangel-Peraza, G., González-Farías, F. A., De Anda, J., Martínez-Meyer, E., & Macías-Cuellar, H. (2012). Uso del modelado de nicho ecológico como una herramienta para predecir la distribución potencial de *Microcystis* sp (cianobacteria) en la Presa Hidroeléctrica de Aguamilpa, Nayarit, México. *Ambiente & Agua-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 7(1), 218–234. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.607>
32. IDEAM-UNAL. (2018). La variabilidad y el cambio climáticos en Colombia. Bogota, D.C., 28. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/variabilidad.pdf> [Consultado el 23 de agosto de 2019].

33. IPCC, 2019. Calentamiento global de 1,5 °C. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf [Consultado el 8 de agosto de 2020].
34. Kao, H. Y., & Lagerloef, G. S. (2015). Salinity fronts in the tropical Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(2), 1096-1106. <https://doi.org/10.1002/2014JC010114>
35. Ketchum, J. T., Hearn, A., Klimley, A. P., Espinoza, E., Peñaherrera, C., & Largier, J. L. (2014). Seasonal changes in movements and habitat preferences of the scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) while refuging near an oceanic island. *Marine Biology*, 161(4), 755–767. <https://doi.org/10.1007/s00227-013-2375-5>
36. Ko, G. W., Dineshram, R., Campanati, C., Chan, V. B., Havenhand, J., & Thiyagarajan, V. (2014). Interactive effects of ocean acidification, elevated temperature, and reduced salinity on early-life stages of the Pacific oyster. *Environmental Science & Technology*, 48(17), 10079-10088. <https://doi.org/10.1021/es501611u>
37. Leach, K., Montgomery, W. I., & Reid, N. (2016). Modelling the influence of biotic factors on species distribution patterns. *Ecological Modelling*, 337, 96-106. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.06.008>
38. Lezama-Ochoa, N., Murua, H., Hall, M., Román, M., Ruiz, J., Vogel, N., ... & Sancristobal, I. (2017). Biodiversity and habitat characteristics of the bycatch assemblages in fish aggregating devices (FADs) and school sets in the Eastern Pacific Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 4, 265. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00265>.
39. Luna, P. D. M., & Cota, S. E. L. (2013). Cambio climático y amniotas marinos: evidencias, hipótesis e incertidumbre. *Interciencia*, 38(10), 712-718.
40. Marie, A. D., Miller, C., Cawich, C., Piovano, S., & Rico, C. (2017). Fisheries-independent surveys identify critical habitats for young scalloped hammerhead sharks (*Sphyrna lewini*) in the Rewa Delta, Fiji. *Scientific Reports*, 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17152-0>
41. Martin, C. S., Vaz, S., Ellis, J. R., Lauria, V., Coppin, F., & Carpentier, A. (2012). Modelled distributions of ten demersal elasmobranchs of the eastern English Channel in relation to the environment. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 418–419, 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2012.03.010>
42. Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., & Muñoz, J. (2012). Modelos de distribución de especies y su potencialidad como recurso educativo interdisciplinar. *Reduca (Biología)*, 5(1).
43. McGregor, S., Timmermann, A., Stuecker, M. F., England, M. H., Merrifield, M., Jin, F. F., & Chikamoto, Y. (2014). Recent Walker circulation strengthening and Pacific cooling amplified by Atlantic warming. *Nature Climate Change*, 4(10), 888-892. <https://doi.org/10.1038/nclimate2330>
44. Nalesso, E., Hearn, A., Sosa-Nishizaki, O., Steiner, T., Antoniou, A., Reid, A., ... & Ketchum, J. T. (2019). Movements of scalloped hammerhead sharks (*Sphyrna lewini*) at Cocos Island, Costa Rica and between oceanic islands in the Eastern Tropical Pacific. *PloS one*, 14(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213741>

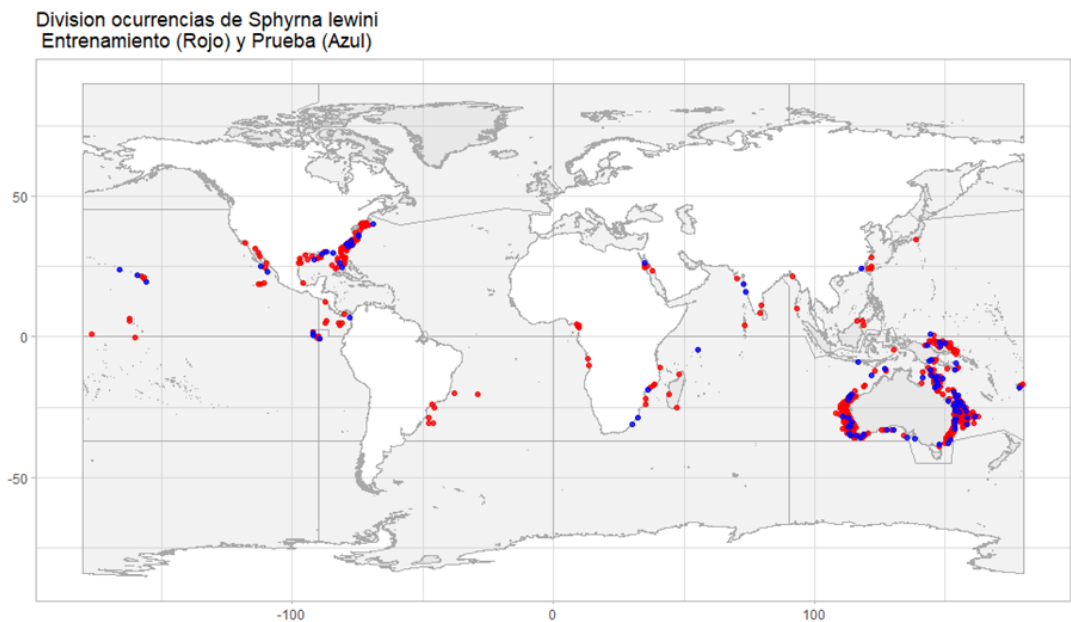
45. Navarro-Monterroza, E., Arias, P. A., & Vieira, S. C. (2019). El Niño-Oscilación del Sur, fase Modoki, y sus efectos en la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(166), 120. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.704>
46. Oyarzún, D., & Brierley, C. M. (2019). The future of coastal upwelling in the Humboldt current from model projections. *Climate Dynamics*, 52(1–2), 599–615. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4158-7>
47. Owens, H. L., Campbell, L. P., Dornak, L. L., Saupe, E. E., Barve, N., Soberón, J., ... & Peterson, A. T. (2013). Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas. *Ecological modelling*, 263, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.04.011>
48. Papastamatiou, Y. P., Watanabe, Y. Y., Bradley, D., Dee, L. E., Weng, K., Lowe, C. G., & Caselle, J. E. (2015). Drivers of daily routines in an ectothermic marine predator: Hunt warm, rest warmer? *PLoS ONE*, 10(6), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127807>
49. Peterson, A. T., Papeş, M., & Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213(1), 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008>
50. Pistevos, J. C., Nagelkerken, I., Rossi, T., Olmos, M., & Connell, S. D. (2015). Ocean acidification and global warming impair shark hunting behaviour and growth. *Scientific Reports*, 5(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep16293>
51. Pliscoff, P., & Fuentes-Castillo, T. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande*, (48), 61–79. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022011000100005>
52. Pörtner, H. O., & Knust, R. (2007). Climate change affects marine fishes through the oxygen limitation of thermal tolerance. *Science*, 315(5808), 95–97. <https://doi.org/10.1126/science.1135471>
53. Poulakis, G. R., Stevens, P. W., Timmers, A. A., Wiley, T. R., & Simpfendorfer, C. A. (2011). Abiotic affinities and spatiotemporal distribution of the endangered smalltooth sawfish, *Pristis pectinata*, in a south-western Florida nursery. *Marine and Freshwater Research*, 62(10), 1165–1177. <https://doi.org/10.1071/MF11008>
54. Rivas, M. L., Spínola, M., Arrieta, H., & Faife-Cabrera, M. (2018). Effect of extreme climatic events resulting in prolonged precipitation on the reproductive output of sea turtles. *Animal Conservation*, 21(5), 387–395. <https://doi.org/10.1111/acv.12404>
55. Roberts, C. M., O'Leary, B. C., McCauley, D. J., Cury, P. M., Duarte, C. M., Lubchenco, J., ... & Worm, B. (2017). Marine reserves can mitigate and promote adaptation to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(24), 6167–6175. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701262114>
56. Rodríguez, E., & Giraldo, A. (2011). Características oceanográficas en isla Malpelo y su relación con la cuenca oceánica del Pacífico Colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, (40), 19–32. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2011.40.0.126>

57. Rosa, R., Baptista, M., Lopes, V. M., Pegado, M. R., Ricardo Paula, J., Trübenbach, K., ... & Repolho, T. (2014). Early-life exposure to climate change impairs tropical shark survival. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1793), 20141738. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1738>
58. Salinas de León, P., Hoyos-Padilla, E. M., & Pochet, F. (2017). First observation on the mating behaviour of the endangered scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini* in the Tropical Eastern Pacific. *Environmental Biology of Fishes*, 100(12), 1603–1608. <https://doi.org/10.1007/s10641-017-0668-0>
59. Salomón-Aguilar, C. A., Villavicencio-Garayzar, C. J., & Reyes-Bonilla, H. (2009). Zonas y temporadas de reproducción y crianza de tiburones en el Golfo de California: Estrategia para su conservación y manejo pesquero. *Ciencias Marinas*, 35(4), 369–388.
60. Schlaff, A. M., Heupel, M. R., & Simpfendorfer, C. A. (2014). Influence of environmental factors on shark and ray movement, behaviour and habitat use: a review. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 24(4). <https://doi.org/10.1007/s11160-014-9364-8>
61. Srivastava, V., Griess, V. C., & Padalia, H. (2018). Mapping invasion potential using ensemble modelling. A case study on *Yushania maling* in the Darjeeling Himalayas. *Ecological Modelling*, 385, 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.07.001>
62. Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 437-441. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011>
63. Soler, G. A., Bessudo, S., & Guzmán, A. (2013). Long term monitoring of pelagic fishes at Malpelo Island, Colombia. *Latin American Journal of Conservation*, 3(2), 28-37.
64. Speed, C. W., Meekan, M. G., Field, I. C., McMahon, C. R., & Bradshaw, C. J. (2012). Heat-seeking sharks: support for behavioural thermoregulation in reef sharks. *Marine Ecology Progress Series*, 463, 231-244. <https://doi.org/10.3354/meps09864>
65. Tyberghein, L., Verbruggen, H., Pauly, K., Troupin, C., Mineur, F., & De Clerck, O. (2012). Bio-ORACLE: a global environmental dataset for marine species distribution modelling. *Global ecology and biogeography*, 21(2), 272-281. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00656.x>
66. Varela, S., Mateo, R. G., García-Valdés, R., & Fernández-González, F. (2014). Macroecología y ecoinformática: sesgos, errores y predicciones en el modelado de distribuciones. *Revista Ecosistemas*, 23(1), 46-53. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2014.23-1-07>
67. Vasquez, M. C., & Tomanek, L. (2019). Sirtuins as regulators of the cellular stress response and metabolism in marine ectotherms. *Comparative Biochemistry and Physiology -Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 236, 110528. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2019.110528>
68. Wang, D., Gouhier, T. C., Menge, B. A., & Ganguly, A. R. (2015). Intensification and spatial homogenization of coastal upwelling under climate change. *Nature*, 518(7539), 390-394. <https://doi.org/10.1038/nature14235>

69. Xiu, P., Chai, F., Curchitser, E. N., & Castruccio, F. S. (2018). Future changes in coastal upwelling ecosystems with global warming: The case of the California Current System. *Scientific Reports*, October 2017, 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21247-7>
70. Yates, P. M., Heupel, M. R., Tobin, A. J., & Simpfendorfer, C. A. (2015). Ecological drivers of shark distributions along a tropical coastline. *PLoS ONE*, 10(4), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121346>
71. Zanella, I., López-Garro, A., McComb-Kobza, D. M., Golfín-Duarte, G., Pérez-Montero, M., & Morales, J. (2016). First record of young-of-the-year Scalloped hammerhead shark, *Sphyrna lewini* (Carcharhiniformes: Sphyrnidae) from Isla del Coco National Park, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 64(1), S201–S204. <https://doi.org/10.15517/rbt.v64i1.23448>
72. Zheng, X. T., Xie, S. P., Lv, L. H., & Zhou, Z. Q. (2016). Intermodel uncertainty in ENSO amplitude change tied to Pacific Ocean warming pattern. *Journal of Climate*, 29(20), 7265–7279. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0039.1>

10. ANEXOS

A continuación, se muestran algunos análisis complementarios que se realizaron en la metodología que incluye la partición de datos de entrenamiento y prueba, donde a su vez se pueden observar la distribución de puntos en una extensión global (Figura 2) junto con un análisis espacial de frecuencia de ocurrencias (Figura 8). Finalmente, se muestra el análisis de correlación de Pearson que se realizó para lograr seleccionar las variables que se incluirían en los sets para realizar la modelación (Figura 3).



Trabajo

Figura 2. Distribución de ocurrencias a lo largo del mundo y partición de datos de ocurrencias en entrenamiento (puntos rojos) y prueba (puntos azules).

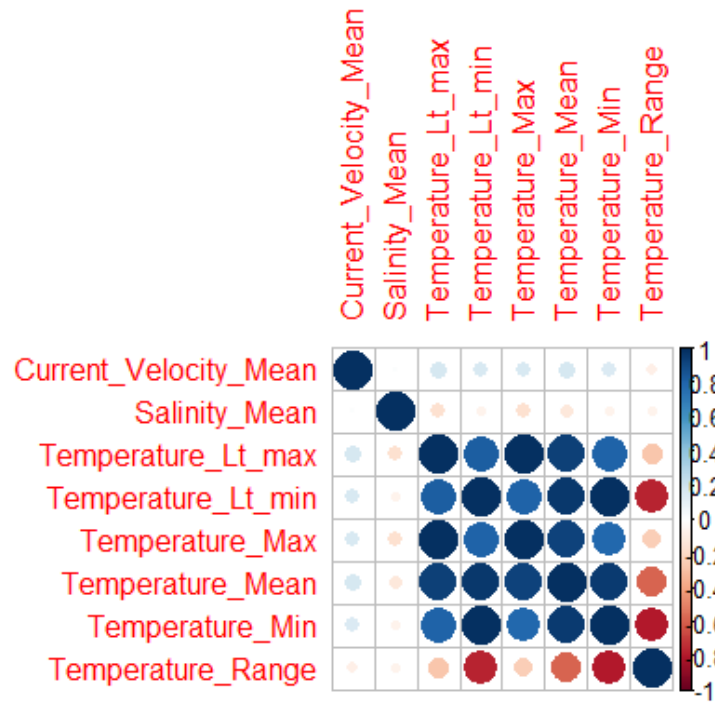
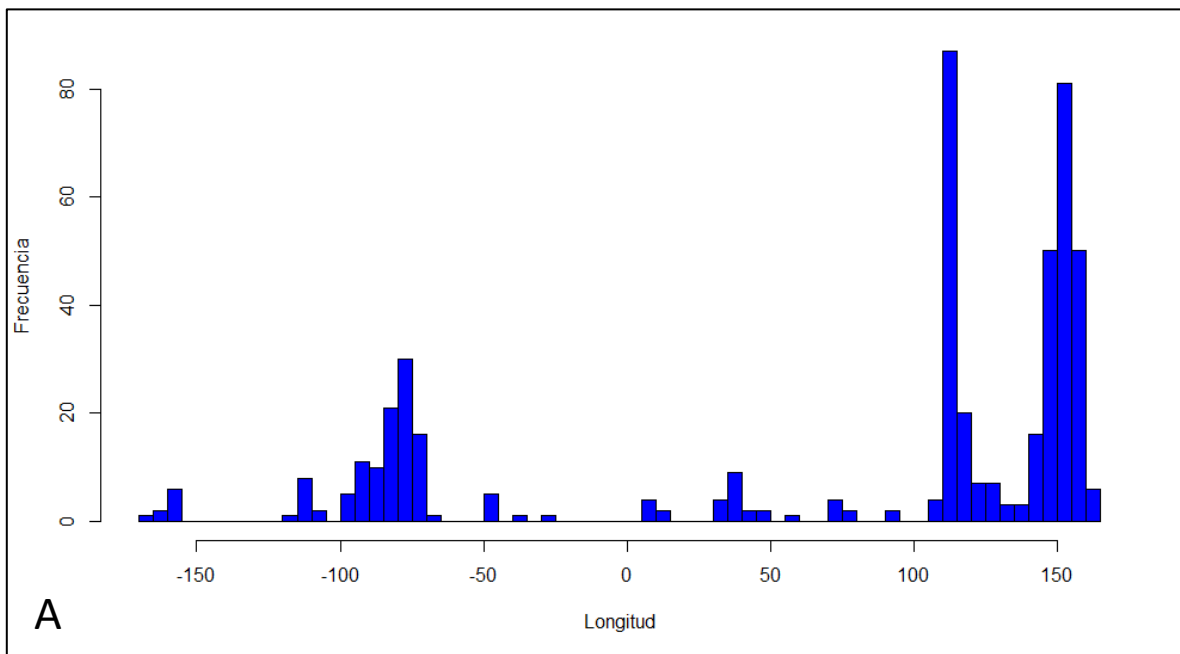


Figura 3. Análisis de correlación de Pearson para las ocho variables seleccionadas. Tonalidades azules oscuras representan una correlación positiva alta, por otro lado, las tonalidades rojas oscuras representan una correlación negativa alta.



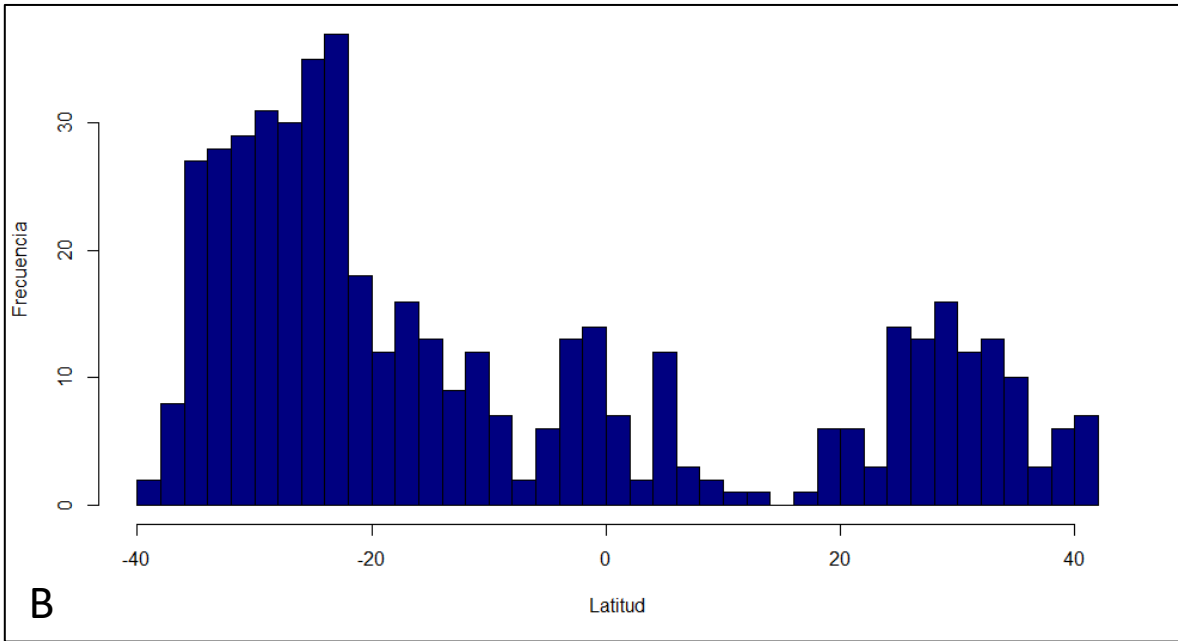


Figura 8. Análisis espacial de la frecuencia de ocurrencias de *Sphyrna lewini* que se encuentran a lo largo del mundo. A) Representa un histograma con la frecuencia de datos longitudinalmente. B) Representa un histograma con la frecuencia de datos latitudinalmente.

Climate variability and change due to anthropic influence has brought alterations in marine ecosystems, besides, have affected the physiology and metabolism of ectotherm species such as the common hammerhead shark (*Sphyrna lewini*). Moreover, it is unknown about climate variability impact may have on the distribution of this species, especially in the Eastern Tropical Pacific Marine Corridor. It is considered an area that harbors great marine biodiversity. The objective of this project was to evaluate the effect of climate variability and climate change on the oceanographic distribution of the hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) in the Eastern Tropical Pacific Marine Corridor. We made a contrast between two scenarios: present and future (2050). As a methodology, we made an ecological niche model from the KUENM package of R software that uses the maximum entropy algorithm (MaxEnt). The modeling was done for the year 2050 under scenarios RCP2.6 and RCP8.5. A total of 952 models were made, of which only one had the statistical parameters established as optimal. Towards future scenarios, the environmental suitability for *S.lewini* shows that this species would migrate to the south in the Chilean Pacific. In fact, it is associated with a possible warming that the equatorial zone will have and the possible cooling that the subtropical zone of the South Pacific will have by 2050, product of changes in oceanographic dynamics.