



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA
UNIDAD MULTIDICIPLINARIA DE INVESTIGACIÓN Y DOCENCIA SISAL
BIOLOGÍA MARINA

Estimación de la distribución espacio-temporal potencial de especies capturadas por la flota
artesanal en la península de Yucatán

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO ACADEMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

PRESENTA:

RODRIGO LÓPEZ SALAZAR

Director de tesis:

Dr. Edgar Torres Irineo

Posgrado de ciencias del mar y limnología

Comité tutor:

Dra. Cecilia Elizabeth Enriquez Ortiz

Facultad de Ciencias, UNAM

Dr. Edlin Guerra Castro

Escuela Nacional de Estudios Superiores, Mérida, UNAM

Dr. Jorge Alberto López Rocha

Facultad de Ciencias, UNAM

Dr. Carlos Yáñez Arenas

Facultad de Ciencias, UNAM

Asesora externa:

Dra. María Grazia Pennino

Instituto Español de Oceanografía, Vigo

México, Mérida, Octubre, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

Resumen	1
Introducción	2
Capítulo 1. Contexto de las pesquerías artesanales en Yucatán	5
1.1 Descripción ambiental	6
1.1.1 Caracterización ambiental	6
1.1.2 Riesgos ambientales	9
1.2 La pesca en Yucatán	11
1.3 El sistema pesquero y el comportamiento del pescador	14
1.4 Asignación espacio-temporal del esfuerzo de pesca	15
Hipótesis	17
Objetivos	18
Objetivo general:	18
Objetivos particulares:	18
Capítulo 2. Identificación de métiers	19
2.1 Construcción de los métiers	19
2.2 Metodología	20
2.2.1 Diseño experimental	20
2.2.2 Datos	21
2.2.3 Análisis estadísticos	21
2.3 Resultados	25
2.3.1 Especies que caracterizan los ensamblajes de especies capturados por la jimba y el buceo en la pesca artesanal de Yucatán	25
2.4 Discusión	30
Capítulo 3. Determinación espacio-temporal de zonas potenciales de pesca	33
3.1 Modelación espacio-temporal de las pesquerías	33
3.1.1 Modelos correlativos	34
3.2 Metodología	35
3.2.1 Variables ambientales	36
3.2.2 Modelo climático HYCOM	36
3.2.3 Evaluación de modelos	37
3.2.4 Determinación de las zonas potenciales de pesca	38
3.3 Resultados	39

3.3.1 Evaluación y proyección de los modelos de distribución de especies	39
3.3.2 Modelo de zona potencial de pesca para el pulpo capturado con jimba	40
3.3.3 Modelo de zona potencial de pesca para el boquinete capturado con buceo	42
3.4 Discusión	45
3.4.1 Operación de las capturas de pulpo realizadas con la jimba en Yucatán	47
3.4.2 Operación de las capturas de boquinete realizadas con buceo en Yucatán	49
Conclusiones	51
Referencias bibliográficas.....	54

Índice de Figuras

<i>Figura 1. A la izquierda la península de Yucatán, anillo de cenotes marcados con puntos y fallas con cruces, al lado derecho distribución vertical de la temperatura (°C) en la columna de agua frente a la costa de Cabo Catoche, Quintana Roo, modificado de (Enriquez et al., 2013).</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2. Ubicación geográfica de Sisal, Dzilam de Bravo y Río Lagartos, donde se realizará el presente estudio.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3. Calendario anual de las temporadas de pesca para cada especie y los métodos de pesca. (Modificado de Salas et al. 2019b).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4. Gráfico de cajas y bigotes donde se observa la homogeneidad de varianzas entre los tres puertos para, a) el arte de pesca jimba y b) el método de pesca buceo.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 5. NMDS del método de jimba (a) y buceo (b) para los puertos de Sisal (azul), Dzilam de Bravo (rojo) y Río Lagartos (verde).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 6. Resultado de Indicator Value para las especies capturadas por el arte de pesca jimba en los puertos de Sisal, Dzilam de Bravo y Río lagartos.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 7. Resultado de Indicator Value para las especies capturadas por el arte de pesca buceo en los puertos de Sisal, Dzilam de Bravo y Río lagartos.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 8. Métiets identificados para los métodos de pesca de Gareteo y Buceo.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 9. Gráficos de respuestas funcionales de las variables predictivas para la captura de pulpo con el arte de pesca de jimba.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 10. Proyecciones mensuales de MZPP “JPuY”. La escala de colores representa las probabilidades de una zona potencial de pesca de pulpo por medio de la jimba. Colores cálidos representan mayor probabilidad, colores fríos menor probabilidad.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 11. Gráficos de respuestas funcionales de las variables predictivas para la captura de Boquinete con el método de pesca de buceo.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 12. Proyecciones mensuales de MZPP “BBoY”. La escala de colores representa las probabilidades de una zona potencial de pesca de boquinete por medio del buceo. Colores cálidos representan mayor probabilidad, colores fríos menor probabilidad.</i>	<i>44</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Resultados de las pruebas de PERMANOVA modificado para los métodos de pesca jimba y buceo.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 2. Lista de modelos disponibles en la paquetería BIOMOD 2 del lenguaje de programación R.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 3. Resultados de las métricas de evaluación para los modelos ensamblados</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 4. Rango de variables de importancia para los modelos JPuY y BBoY.....</i>	<i>39</i>

Resumen

En el mundo más del 80% de las pesquerías es realizada por embarcaciones artesanales (FAO, 2020), a pesar de la importancia de la actividad existe poca o nula información sobre la dinámica espacio-temporal de su esfuerzo de pesca. Esto debido a lo complejo que resulta llevar a cabo un seguimiento de las operaciones de la flota artesanal donde se ocupan diversos artes de pesca para capturar múltiples especies objetivo. El interés de este estudio es generar información que permita comprender 1) cómo se distribuye el esfuerzo de pesca en la costa de Yucatán, para ello se generaron unidades de manejo también conocidas como “métiers” a partir de técnicas multivariadas (PERMANOVA, NMDS y INDVAL) y 2) para conocer la asignación espacio-temporal del esfuerzo de pesca con base en variables ambientales se implementaron modelos correlativos. Los sitios de muestreo fueron tres puertos de Yucatán: Sisal, Dzilam de Bravo y Río Lagartos. En estos puertos se realizaron viajes a bordo de embarcaciones artesanales, en los cuales se registró espacialmente las operaciones de pesca realizadas en las embarcaciones a través de GPS y mediante bitácoras, se registraron las capturas obtenidas con los artes de pesca (i) jimba, permitida de agosto a diciembre para la captura de pulpo (*Octopus maya* y *O. vulgaris*) y (ii) el buceo, permitido de junio a febrero para la captura de langosta espinosa (*Panulirus argus*). Los resultados mostraron diferencias significativas en la composición de especies entre los tres puertos, para ambos artes de pesca. Con esta información se generaron cinco métiers, en los cuales, consistentemente las especies más importantes fueron el pulpo y el boquinete capturados con la jimba y el buceo respectivamente. Los datos espaciales de capturas de estas especies fueron utilizados para determinar zonas potenciales de pesca de acuerdo con el arte de pesca utilizado. Estos resultados contribuyen al entendimiento de la dinámica espacio-temporal de la flota artesanal de Yucatán y podrían ser tomados en cuenta para el diseño de esquemas de manejo espaciales en la región.

Introducción

En México, la pesca es un sector muy relevante para la microeconomía, en el cual laboran alrededor de 300,000 pescadores (~90% son artesanales), pero si se consideran empleos indirectos y sus familias, se estima que alrededor de 12 millones de mexicanos están ligados a las actividades del sector pesquero (CONAPESCA, 2018). La importancia económica de la actividad ha aumentado con el paso del tiempo, en el 2018 se alcanzó \$41 billones de pesos generados por la captura registrada de 2 millones de toneladas de productos del mar (CONAPESCA, 2018). Sin embargo, no existe un plan de manejo espacial en áreas marinas para regular a las pesquerías ribereñas o artesanales. Esto debido a que la colecta de información espacial y temporal es particularmente complicada y costosa, ya que México cuenta con un extenso litoral, donde diariamente navegan alrededor de 75,000 embarcaciones artesanales, lo cual dificulta la implementación de sistemas de monitoreo satelital como sí se realiza en embarcaciones industriales o de programas de observadores a bordo (CONAPESCA, 2018).

A pesar de la existencia de otros instrumentos de manejo, se siguen dando problemas de sobreexplotación en pesquerías (Hernandez & Kempton, 2003). Uno de los problemas que se observan, es que el manejo pesquero se ha realizado bajo un enfoque uni-específico, el cual busca maximizar la captura de especies objetivo, ignorando procesos inherentes de las pesquerías, como las interacciones ecológicas y pesqueras: hábitat-especie, especies-artes de pesca, pesca incidental, etc. (Pikitch *et al.*, 2004). A pesar de la importancia de las pesquerías artesanales, que son de naturaleza multi-específica y multi-artes, aún se conoce poco de la asignación espacial del esfuerzo de pesca, así como la relación entre los ensamblajes de especies capturados con los artes de pesca utilizados.

Entre la diversidad de métodos y artes de pesca que se utilizan en la costa de Yucatán, la jimba y el buceo son de los más utilizados y con los que se extraen recursos de importancia comercial, como la langosta (*Panulirus argus*), pepino de mar (*Isostichopus badiotus* y *Holothuria floridana*), pulpo (*Octopus maya* y *O. vulgaris*) y mero (*Epinephilus morio*), así como especies asociadas. En este contexto de la pesca artesanal, resulta fundamental generar conocimiento encaminado a entender la dinámica espacio-temporal entre los recursos pesqueros y las operaciones de pesca realizadas por los

pescadores a fin de que pueda ser incorporada en los esquemas de manejo de esta actividad económica en la región y en el país.

La motivación del pescador para seleccionar el lugar donde asignará su esfuerzo de pesca dependerá de las especies de valor comercial que se encuentren disponibles en la localidad, las cuales se distribuyen en el espacio, delimitadas por barreras físicas y ambientales (Brodie *et al.*, 2018), definiendo las interacciones entre pescador y las especies. Debido a esto es razonable asumir que la composición de las capturas realizadas por un arte de pesca determinado será diferente en distintos lugares. En este sentido, la formación de métiers a través de modelos multidimensionales ha permitido caracterizar la variabilidad de las interacciones entre los artes de pesca y la composición de especies (Monroy *et al.*, 2010).

El análisis de información espacio-temporal de pesca puede ser implementado a través de modelos correlativos como los utilizados en modelos de distribución de especies (SDM por sus siglas en inglés) los cuales son ampliamente ocupados en los estudios de ecología, donde se identifica cual es el espacio ambiental multivariado que delimita la distribución de las especies, para después observar los sitios que cumplen con estas características ambientales en un espacio geográfico (Araújo & Peterson, 2012; Torres-Irineo *et al.*, 2021). Este tipo de modelos pueden ser empleados en el análisis de las pesquerías artesanales con lo cual se pueda determinar zonas potenciales de pesca de especies capturadas por la flota artesanal dados los métodos/artes de pesca utilizados, por ende, la potencial asignación del esfuerzo de pesca (Torres-Irineo *et al.*, 2021).

En el presente estudio se pretende identificar la asignación espacial y temporal del esfuerzo de pesca a través de la interacción entre un conjunto de especies objetivo y el uso de dos artes de pesca (jimba y buceo) en tres puertos de Yucatán con lo cual se formarán métiers también denominados unidades de manejo. Para este fin, utilizaremos 1) análisis multivariados que permitan determinar las especies que caracterizan las capturas de los artes de pesca en cada puerto y 2) modelos para determinar zonas potenciales de pesca (MZPP) de las especies capturadas por los artes de pesca analizados.

En el primer capítulo se presenta el marco contextual donde se lleva a cabo el estudio, abordando la caracterización ambiental de la península de Yucatán, el contexto de las pesquerías que se llevan a cabo en la región y el marco legal. Se describe en qué consiste el sistema pesquero, así como la relevancia de considerar el comportamiento humano y cómo

influye sobre la asignación del esfuerzo pesquero. Se exponen los objetivos, hipótesis y preguntas de investigación.

El segundo capítulo inicia la primera parte del estudio en el cual se establece cuáles son los criterios de la formación de métiers, la metodología del muestreo y la obtención de datos. Se establece el diseño experimental del estudio y se describen los análisis estadísticos que se llevan a cabo para definir la estructura de los métiers, resultados y discusión de los resultados. Los análisis de este capítulo permitirán determinar si la relación entre los artes de pesca y las especies capturadas debe ser considerada como una sola unidad en la costa de Yucatán o por regiones (grupos de puertos). De igual manera, se podrán identificar aquellas especies que caractericen las capturas observadas en cada métier. Los resultados servirán de referencia para la determinación de zonas potenciales de pesca de especies de importancia comercial.

En el tercer capítulo se construyen modelos correlativos para determinar las zonas potenciales de pesca donde se explican las bases teóricas de estos modelos y se explica cuál será la estrategia para construirlos, así como las técnicas estadísticas para su evaluación. A partir de los modelos construidos se realizaron proyecciones espaciales y temporales de los métiers resultantes del capítulo 2.

Capítulo 1. Contexto de las pesquerías artesanales en Yucatán

La pesca artesanal es una actividad que contribuye a la generación de empleo y al desarrollo rural, garantizando fuentes de alimento e ingresos económicos a comunidades ribereñas y costeras sin importar su nivel de desarrollo. Los recursos que se obtienen de ella suministran de alimentos ricos en proteínas de alta calidad, contribuyendo a los objetivos de seguridad alimentaria. Por ello el desarrollo de esta actividad de manera sustentable forma parte de los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS 14b). En contraparte el estado de la mayoría de los stocks pesqueros se encuentran plenamente explotados o sobre explotados debido al incremento en la demanda de productos pesqueros, limitaciones en el enfoque de manejo y ausencia de políticas de pesca adecuadas (Salas *et al.*, 2019b). Por ello es relevante generar información científica que coadyuve al entendimiento del sistema pesquero de la flota artesanal y permita encontrar respuestas a los desafíos impuestos por dicha actividad.

En la costa de Yucatán la pesca representa una de las actividades más importantes del estado, donde la flota artesanal representa el 88% de las embarcaciones pesqueras (CONAPESCA, 2018). Esta flota se caracteriza por ocupar embarcaciones menores a 12 m de eslora, realizando generalmente viajes cortos no mayores a tres días (LGPAS, 2018), en la cual los pescadores ocupan distintos artes de pesca para capturar diferentes especies que se encuentren disponibles en la localidad. La decisión sobre qué especie capturar y qué arte de pesca utilizar dependerá de los intereses particulares del pescador (alimentación, económicos, recreativos), exposición al riesgo, restricciones gubernamentales, temporada del año, el estado de las condiciones climáticas, incentivos por parte del mercado (Salas & Gaertner, 2004).

La evaluación espacio-temporal de la asignación del esfuerzo pesquero de la flota artesanal es información necesaria en la formulación de programas de ordenación pesquera y el manejo espacial marítimo de las pesquerías artesanales. Sin embargo, en los esquemas de regulación no se contemplan las diferencias que existen en las operaciones de pesca. La complejidad vinculada a las pesquerías artesanales requiere comprensión de la heterogeneidad inmersa en las operaciones de pesca, abordando su estudio con un enfoque holístico, donde se consideren procesos ambientales, características de las áreas de pesca, disponibilidad de recursos, regulaciones gubernamentales y el comportamiento del pescador.

En este sentido se abordará un análisis exploratorio sobre los elementos característicos del medio ambiente del sitio de pesca, el marco regulatorio y estado de las pesquerías en el estado de Yucatán, elementos clave del comportamiento del pescador y las consideraciones de los análisis espacio-temporales.

1.1 Descripción ambiental

1.1.1 Caracterización ambiental

Las características físicas y ambientales de la costa de Yucatán delimitan el hábitat ideal de un amplio número de especies de importancia comercial, también es el escenario donde se llevan a cabo diversas actividades de pesca. La geomorfología de esta área reside en una extensa plataforma costera constituida de material kárstico que se caracteriza por tener una pendiente suavizada que disminuye gradualmente hasta los ~ 60 m de profundidad incrementado su pendiente hasta los ~ 210 m de profundidad, la cual forma parte del Banco de Campeche (Balsam & Beeson, 2003; Paz-ríos *et al.*, 2020).

La costa de Yucatán tiene una extensión de 365 km, la cual está compuesta de varias lagunas costeras y carece de ríos superficiales, estos sistemas lagunares son cuerpos de agua separados del océano por islas de barrera, generalmente se encuentran orientados de forma paralela a la costa y se conectan con el océano a través de ensenadas (Kjerfve, 1994). Su función es muy importante ya que son la transición entre el agua dulce continental y el agua marina, por lo cual, cuentan con muchos tipos de hábitats, soportando una gran diversidad ecológica y son sitios de alta productividad (Basset *et al.*, 2013). Debido a la permeabilidad del karst, se producen importantes aportes de agua subterránea continental hacia aguas marinas, la cual se caracteriza por tener baja salinidad y altas concentraciones de nitratos y silicatos (Herrera-Silveira & Morales-Ojeda, 2018). A pesar de que existen varios aportes de agua subterránea, salobre y rica en nutrientes a lo largo de la costa de Yucatán, frente a la costa de Dzilam de Bravo se produce el de mayor volumen, debido a que se encuentra la desembocadura del anillo de cenotes (Herrera-Silveira *et al.*, 2004; Vera *et al.*, 2012). En un estudio realizado por Valle-Levinson *et al.* (2011), se estima que los aportes de agua salobre provenientes del continente son cercanos a los $43,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, los cuales incrementan durante los procesos de marea baja y la temporada de lluvias.

En la región se identifica la presencia de dos masas de agua. La primera es una masa de agua profunda, fría y rica en nutrientes que proviene del Mar Caribe, la cual se incorpora sobre la plataforma costera a través del fenómeno de surgencia ubicada frente a Cabo Catoche, la segunda es una masa de agua local, hipersalina y cálida, la cual se forma debido a las altas temperaturas y elevados niveles de evaporación (Enriquez *et al.*, 2013). Estas masas de agua se ven afectadas por los aportes de agua subterránea proveniente el continente, provocando variaciones relevantes en la salinidad, por efectos de dilución (Herrera-Silveira, *et al.*, 2010). Debido a estas características las fuerzas del gradiente de presión barotrópico y baroclínico determinan la distribución de los cuerpos de agua, por lo cual la advección entre estas masas de agua presentan dinámicas de intercambio de propiedades y materiales, de aguas costeras hacia zonas más profundas en el océano (Enriquez *et al.*, 2013).

Frente a la costa de Cabo Catoche se encuentra la frontera entre la plataforma costera y el Canal de Yucatán el cual es un cañón con más de 2000 m de profundidad que corre paralelo a las costas de Quintana Roo (Figura 1). En este sitio se produce una surgencia con agua subtropical de profundidades de ~300 m, que proviene del Mar Caribe con temperaturas por debajo de los 23° C y rica en nutrientes la cual se distribuye a lo largo de la plataforma de Yucatán ocupando el fondo de la columna de agua, la cual se intensifica al finalizar la primavera y durante el otoño (Reyes-Mendoza *et al.*, 2019). Este fenómeno acarrea agua fría con alta concentración de sal sobre la plataforma de Yucatán, la cual contrasta en densidad con el agua caliente por efecto de la radiación solar en la superficie de la plataforma, desarrollando un proceso de estatificación pronunciada (Enriquez *et al.*, 2013). La dispersión de los aportes de agua provenientes de la surgencia viajan al interior del Banco de Campeche con dirección oeste, influenciada por la trayectoria e intensidad de la Corriente de Yucatán y las características batimétricas de la plataforma, degradando la temperatura y la concentración de nutrientes conforme se interna hacia el Golfo de México (Paz-ríos *et al.*, 2020; Enriquez *et al.*, 2010).

Distribución espaciotemporal potencial de especies capturadas por la flota artesanal

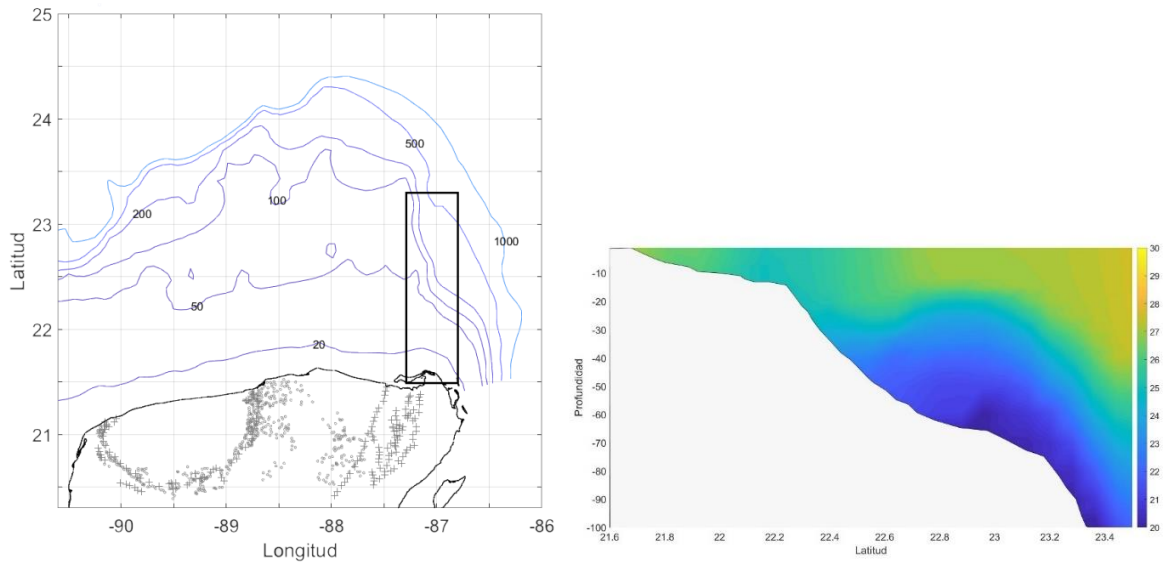


Figura 1. A la izquierda la península de Yucatán, anillo de cenotes marcados con puntos y fallas con cruces, al lado derecho distribución vertical de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en la columna de agua frente a la costa de Cabo Catoche, Quintana Roo, modificado de (Enriquez *et al.*, 2013).

La dinámica de la masa de agua superficial de Yucatán se ve afectada por tres temporadas climáticas: la “temporada de secas” de marzo a mayo, cuando la tasa de evaporación es mayor a la de precipitación y la velocidad de los vientos en promedio es de 18 a 20 km/h ; la “temporada de lluvias” de junio a octubre, la precipitación es mayor a 110 mm y la velocidad promedio del viento es de 15 a 20 km/h ; y la “temporada de nortes” de noviembre a febrero, en la cual predominan fuertes vientos fríos con velocidades entre 50 a 90 km/h , provenientes de los frentes polares (Herrera-Silveira 1994; Reyes-Mendoza *et al.*, 2019). Estos cambios estacionales rigen la dinámica de calentamiento y enfriamiento del agua superficial y en zonas de poca profundidad.

La dirección de los vientos muestra dos comportamientos dominantes a lo largo del año, durante los meses de octubre a marzo la dirección dominante es de norte a sur debido a los frentes fríos provenientes de las masas de aire polar y los meses de abril a septiembre domina un sistema tropical con vientos dirección este a oeste. Además de un sistema de brisas que se encuentra presenta durante todo el año, siendo los meses de abril y mayo los meses de mayor intensidad (Cahuich-López *et al.*, 2020). La velocidad de las corrientes se encuentran entre 0.2 y 0.4 ms^{-1} y esta se encuentra influenciada por la fuerza de los vientos alisios con dirección noreste (Enriquez *et al.*, 2010).

1.1.2 Riesgos ambientales

A nivel mundial los ambientes marinos son particularmente susceptibles a los efectos del cambio climático, como lo son el incremento de la temperatura del mar y la acidificación del océano, alterando la temporalidad y ubicación de los procesos de mezcla y surgencias que rigen el desarrollo productivo de los ambientes marino-costeros (Barhri *et al.*, 2021). Estos cambios físicos y químicos pueden provocar cambios a nivel local, difíciles de comprender, afectando la distribución de las especies, modificando los ecosistemas marinos, por ende, alterando la actividad pesquera. Los resultados obtenidos por algunos modelos estiman que los sistemas de surgencias en los límites orientales probablemente se intensifiquen, provocando mayores descargas de nutrientes, sin embargo, también estiman que las zonas de bajo nivel de oxígeno incrementen principalmente en zonas poco profundas, debido al incremento de la temperatura del mar (Barange *et al.*, 2018).

También existen otros fenómenos naturales que son susceptibles de incrementar en frecuencia o magnitud debido al cambio climático, lo cual aumenta la vulnerabilidad de los pescadores y la disponibilidad de recursos marinos. Entre los riesgos ambientales que se identifican en la península de Yucatán se encuentran los fenómenos de marea roja, los ciclones, eventos de norte y turbonadas. Estos riesgos delimitan el acontecer de la actividad pesquera, impidiendo salir a navegar, afectando las instalaciones de los puertos, poniendo en riesgo la vida o disminuyendo la disponibilidad de recursos, ya sea porque afectan su abundancia o promuevan cambios en la distribución de las especies.

Marea Roja

La marea roja también conocida como florecimiento algal o bloom, es un fenómeno natural que consiste en la proliferación acelerada de algas y/o dinoflagelados que en altas concentraciones cambian la coloración del agua a un color rojo o dorado. Este fenómeno se produce, cuando incrementa la disponibilidad de nutrientes en el océano, lo cual favorece la reproducción acelerada de microorganismos generando condiciones anóxicas en el agua y obstrucción en las branquias de los peces, resultando en altas mortalidades o desplazamiento de organismos acuáticos. En la surgencia de Cabo Catoche se han registrado concentraciones

Distribución espaciotemporal potencial de especies capturadas por la flota artesanal

de clorofila superiores a 1.7 mg.m^{-3} , y abundancia de fitoplancton superior a $734,000 \text{ células/L}$ (Licea *et al.*, 2017).

En Yucatán se han registrado mareas rojas desde 1948 y se ha observado que estos fenómenos suelen iniciar debido al incremento en la disponibilidad de nutrientes que trae consigo la surgencia de Cabo Catoche, que al desplazarse por efecto de las corrientes con dirección hacia el poniente, encuentran nutrientes de origen antropogénico proveniente de las descargas de agua subterránea del anillo de cenotes frente a la costa de Dzilam de Bravo (Enriquez *et al.*, 2010). Estos eventos generan afectaciones al medio ambiente y al sector pesquero, turístico, ya que una gran cantidad de organismos marinos mueren debido al bajo nivel de oxígeno provocado por la marea roja, y el consumo de dichos organismos generan intoxicaciones severas en el cuerpo humano.

Ciclones Tropicales

La península de Yucatán se encuentra expuesta al embate de ciclones tropicales durante la época de lluvias donde también coincide la “temporada de huracanes” que ocurre durante los meses de junio a noviembre. Son depresiones tropicales con vientos destructivos de rápida rotación, que pueden alcanzar velocidades superiores a los 250 km/h (Gómez-Ramírez, 2018). Estos fenómenos se generan en los océanos tropicales y crean lluvias torrenciales, incremento en el nivel del mar, alto oleaje, mareas de tempestad e inundaciones costeras. Los huracanes representan un riesgo elevado para las comunidades pesqueras, ya que las consecuencias que dejan a su paso ponen en riesgo la vida de los habitantes costeros, generan cuantiosos daños económicos, elevadas tasas de mortalidad en organismos acuáticos, daños severos en hábitats costeros y marinos, logrando incluso modificar la morfología y las dinámicas ecológicas del lugar.

Entre los ciclones tropicales más destructivos que han impactado a la península de Yucatán se encuentran Edith en 1971, Gilberto en 1988, Opal y Roxana en 1995, Isidoro en 2002 y Wilma en 2005. Adicionalmente en estudios basados en la recreación de trayectorias de ciclones sintéticos utilizando diversos modelos de circulación global, se estima que incrementa la intensidad y rapidez de los ciclones tropicales por efecto del calentamiento global (Appendini *et al.*, 2019).

Nortes

Los “nortes” son masas de aire frío que se desprenden de la zona polar en el hemisferio norte y se desplazan hacia el sur, durante los meses de noviembre a febrero, las cuales circulan por el noreste de México y el Golfo de México. Se caracterizan por presentar temperatura de 2 a 15 °C y vientos no mayores a 100 km/hr. Estos fenómenos son el evento que limita durante mayor número de días al año la actividad de pesca, ya que provoca el cierre de los puertos durante la presencia de estos.

1.2 La pesca en Yucatán

El estado de Yucatán cuenta con 13 municipios costeros los cuales presentan condiciones sociales y ambientales particulares. Los análisis del presente estudio se realizaron en las comunidades de los puertos en Sisal (SI), Dzilam de Bravo (DB) y Río Lagartos (RL) (Figura 2). Estos puertos se encuentran en zonas con condiciones hidrológicas diferentes, Sisal al poniente del estado tiene fuerte influencia del Golfo de México; Dzilam de Bravo al centro del estado con influencia de aguas subterráneas de origen antrópico y Río Lagartos al oriente con una fuerte influencia del Mar Caribe. Aunado a lo anterior, dichos puertos aportan alrededor del 40% de las capturas del estado.

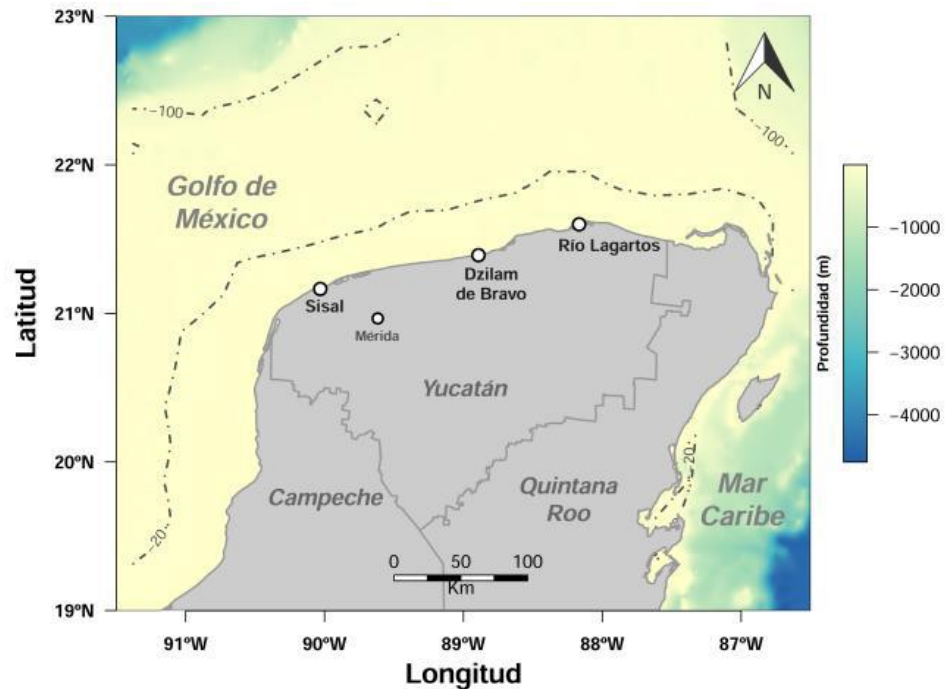


Figura 2. Ubicación geográfica de Sisal, Dzilam de Bravo y Río Lagartos, donde se realizará el presente estudio.

En Yucatán opera una flota artesanal de 3,045 embarcaciones en la cual trabajan 16,936 pescadores (CONAPESCA, 2018). Estas embarcaciones se distinguen por tener entre 7 y 12 m de eslora, motor ente 45 y 75 hp, llevan hasta tres tripulantes y suelen realizar viajes de un día a distancias menores de 40 km de la costa y menos de 35 m de profundidad. Entre los artes de pesca que utilizan se encuentran 1) el cordel o línea de mano; 2) el buceo con compresor, sistema scuba y/o apnea; 3) redes; 4) jimba; y 5) refugios artificiales (Salas *et al.*, 2019b). Entre la diversidad de especies que se capturan en el estado, las principales pesquerías y las temporadas en que se llevan a cabo son (Figura 3): la captura de langosta (*Panulirus argus*) se obtiene con el método de pesca de buceo, durante los meses de julio a febrero; de pulpo (dos especies: *O. maya* y *O. vulgaris*) a través del arte de pesca jimba, y que se captura de agosto a diciembre; de escama marina la cual está compuesta principalmente por organismos demersales tales como meros (*Epinephelus flavolimbatus*, *E. morio*, *E. itajara*, *E. adscencionis*, *E. drummondhayi*, *E. nigrinus*, *Mycteroperca bonaci*, *M. microlepis*, *M. venenosa*, *M. nterstitialis*); pargos (*Lutjanus bucanella*, *L. vivanus*, *L. synagris*, *L. analis*, *L. griseus*, *L. jocu*, *Ocyurus chrysurus*, *Rhomboplites aurorubens*), el besugo (*Calamus bajonado*); el chac-chi (*Haemulon plumieri*); el coronado (*Seriola zonata*); el boquinete (*Lachnolaimus maximus*) y son obtenidas con anzuelo, buceo o redes, capturándose principalmente de abril a enero (Coronado Castro *et al.*, 2013). Adicionalmente, ha cobrado mucha importancia la pesquería de pepino de mar (*Isostichopus badiionotus* y *Holothuria floridiana*) también obtenido con buceo y su temporada de captura depende de los estudios que se realicen para estimar su abundancia, por lo cual no cuenta con una fecha establecida. Particularmente para el contexto del presente estudio, se observa en la Figura 3 el cronograma de los artes de pesca jimba y buceo, junto a las especies que se capturan con ellos.

Distribución espaciotemporal potencial de especies capturadas por la flota artesanal

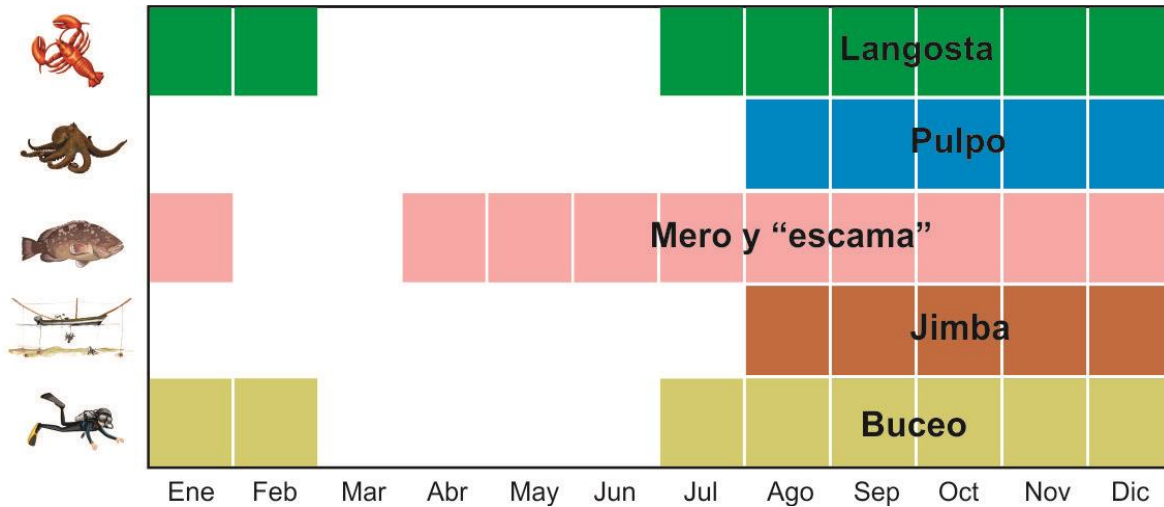


Figura 3. Calendario anual de las temporadas de pesca para cada especie y los métodos de pesca. (Modificado de Salas et al. 2019b)

La jimba es reconocida como un arte de pesca selectivo ya que con este sólo se puede capturar pulpo, además debido al comportamiento de la especie durante el cuidado parental, la hembra no se alimenta por cuidar el desove, por ello no suele haber capturas de hembras que se encuentren en dicho estado. En el caso del buceo es un método multi-específico, ya que con éste el pescador puede capturar cualquier organismo que se encuentre disponible en el área a través de arpones o gancho. Este método podría representar una estrategia adecuada para seleccionar especies que cumplan con la normatividad autorizada, sin embargo, esto no siempre sucede, ya que se captura cualquier especie, siempre que signifique un ingreso económico para el pescador (Salas & Gaertner, 2004). El uso de jimba es regulado a través del plan de manejo de pulpo, mientras que el buceo es regulado con el plan de manejo de langosta espinosa y el de pepino de mar.

La captura de mero rojo (*Epinephelus morio*) ha sido una de las pesquerías de mayor relevancia en el estado, sin embargo sus poblaciones han sido reportadas como sobreexplotadas (Arreguín-Sánchez & Arcos-Huitrón, 2011), la cual es capturada a lo largo de toda la costa por tres flotas (mayor, menor y mediana) siendo la flota mayor quien registra las mayores capturas, y las realizan en zonas profundas (Coronado & Salas, 2010). Se observa que, en tallas pequeñas esta especie se distribuye espacialmente en sitios con bajas profundidades y a medida que crece emigra a zonas más lejanas y profundas, además cambia su ubicación dependiendo de la temporada climática del año (López-Rocha et al., 2009 ; Coronado & Salas, 2010). Es capturada con varios artes de pesca como lo son la línea de

mano o cordel, el palangre, el buceo y durante las capturas de pulpo con jimba debido a que lo acompañan con cordel (Monroy *et al.*, 2010).

La langosta espinosa es una de las especies que proporciona mayores ingresos a los pescadores, se ha reportado que la distribución de la especie ocurre en Arrecife Alacranes, Cayo Arcas y Río Lagartos, donde se encuentra en zonas rocosas o bajo algún refugio (Rios-Lara *et al.*, 2007; Torres-Irineo & Salas, 2008). Sin embargo se ha registrado que los volúmenes en la captura han ido en descenso, sus capturas siempre han estado acompañadas con peces demersales (Torres-Irineo & Salas, 2008).

El pepino de mar comenzó a capturarse a escala comercial en la península desde 2012, pero debido al elevado valor de su precio de venta en el mercado asiático, se ha exacerbado su explotación, provocando un agotamiento de sus poblaciones (Poot-Salazar *et al.*, 2015). Como parte de las estrategias que se han implementado para disminuir la captura de esta especie sobresalen la disminución de la temporada de pesca a un par de semanas al año y la tipificación de su captura ilegal como delincuencia organizada (SAGARPA, 2015).

1.3 El sistema pesquero y el comportamiento del pescador

La pesca es una actividad compleja, la implementación de regulaciones se ve afectada debido a la dificultad que representa limitar el acceso de los usuarios a realizar capturas de los recursos pesqueros, dificultando la implementación de acciones de vigilancia que permitan llevar un control sobre el estado de las poblaciones de organismos marinos (Fulton *et al.*, 2011). Esto favorece la ejecución de prácticas ilegales de pesca, como el uso de artes de pesca prohibidos, captura de especies durante las temporadas de vedas, sobreexplotación de los stocks, por mencionar algunos ejemplos.

Desde sus inicios, el manejo pesquero ha enfocado su atención sobre el estudio de las especies objetivo de forma uni-específica. Sin embargo los sistemas acuáticos siguen degradándose y las poblaciones de organismos marinos siguen disminuyendo, esto debido a que en este enfoque se ignoran otros elementos que comprende el sistema pesquero y no se consideran las respuestas adaptativas del humano (Defeo, 2015; Hernandez & Kempton, 2003). Desde finales de los 1990s se ha propuesto que el manejo de las pesquerías se realice desde un enfoque ecosistémico, con el objetivo de abordar una visión holística e integrar elementos sociales, económicos, ecológicos, marco legal y las relaciones entre ellos,

asumiendo al ser humano como actor principal del uso y transformación de los ecosistemas (Defeo, 2015). En una revisión realizada por Salas *et al.*, 2019a sobre los tópicos de artículos científicos sobre pesquerías artesanales de 1950 al 2015, más del 50% de los documentos revisados eran sobre ecología, ~20% sobre economía, ~10% sobre cadena de valor y sólo el 1% fue sobre evaluaciones que integraron varias líneas del conocimiento.

Dentro del concepto del enfoque ecosistémico se resalta la necesidad de contemplar al ser humano como un elemento transformador, debido a que el éxito o fracaso de las estrategias de manejo, dependen en mucha medida de las respuestas adaptativas del pescador. Cada individuo implementa tácticas y estrategias que le permitan sobreponerse a los retos impuestos por el ambiente o regulaciones pesqueras y así lograr cumplir con sus objetivos sociales, económicos o culturales (Hilborn & Walters, 1992; Salas & Gaertner, 2004). Por ello resulta necesario considerar en la formulación de nuevas regulaciones, información sobre la manera en que el pescador se adapta ante nuevas limitantes y así adecuar mejores estrategias de manejo (Salas & Gaertner, 2004; Van Putten *et al.*, 2012).

1.4 Asignación espacio-temporal del esfuerzo de pesca

La distribución espacial del esfuerzo de pesca es un aspecto importante para ser considerado en el manejo de las pesquerías, ya que puede afectar las tasas de captura y puede ser incorporado dentro de la planeación de herramientas de manejo espacial como las Áreas Marinas Protegidas (Daw, 2008). Diversos factores influyen en la asignación del esfuerzo de pesca tales como: 1) los patrones espaciales de distribución de las especies objetivo y sus hábitats; 2) las ganancias esperadas y los costos incurridos por ir a pescar; 3) el conocimiento previo del sitio por parte de los pescadores; 4) los métodos y artes de pesca empleados; 5) el mercado; 6) características ambientales; 7) medidas de manejo establecidas; entre otros (Salas & Gaertner, 2004). Dependiendo de las condiciones de estos factores, cada pescador determinará la especie objetivo a capturar, el arte de pesca a utilizar y el sitio donde llevará a cabo sus operaciones de pesca (Andersen *et al.* 2012). Las pesquerías multi-específicas y multi-artes se caracterizan por la captura de una variedad de especies usando diversos artes de pesca y se les cataloga como pesquerías mixtas (Pelletier & Ferraris, 2000). En este tipo de pesquerías se ha observado que los ensamblajes de especies capturadas pueden diferir dependiendo del arte de pesca utilizado y el área seleccionada (Shester & Micheli, 2011).

En Europa, para comprender la dinámica de las operaciones de la flota en pesquerías mixtas se ha implementado el enfoque de métiers, el cual consiste en evaluar a las pesquerías agrupándolas como unidades de manejo, caracterizadas por la combinación de un arte de pesca y especies objetivo, en un sitio determinado (Monroy *et al.*, 2010; Ulrich & Andersen, 2004). Bajo esta caracterización de la pesca se facilita comprender la asignación del esfuerzo de pesca agrupando a las embarcaciones por características particulares.

En este contexto, la asignación espacial del esfuerzo de pesca ha sido evaluada a través de 1) observadores a bordo de las embarcaciones, quienes reportan espacialmente las actividades que se realizan en altamar; 2) bitácoras de los capitanes de pesca; y 3) sistemas de monitoreo satelital (e.g. Pennino *et al.*, 2014; Torres-Irineo *et al.*, 2021). A nivel mundial, se han creado diversos programas de observadores a bordo con el fin de que estos reporten con detalle las especies capturadas (sean objetivo o incidentales) derivadas de las operaciones de pesca. Este tipo de información consiste básicamente en reportar el método de pesca usado, las especies capturadas (número y/o peso), las coordenadas geográficas y la hora del día. En las pesquerías artesanales, donde se carece de datos espacialmente explícitos sobre las ocurrencias de las especies objetivo, los datos obtenidos por parte de observadores a bordo de embarcaciones artesanales pueden ser utilizados en conjunto con información ambiental y geográfica para explicar los patrones observados en las ocurrencias de las especies mediante el uso de modelos correlativos, que pueden ser utilizados para definir condiciones bajo las cuales es probable que las especies objetivo de captura puedan estar presentes, similar a los modelos de distribución potencial (Elith & Leathwick, 2009). No obstante, la relevancia de la información que los observadores proveen, este tipo de programas de monitoreo/muestreo han sido establecidos principalmente en embarcaciones industriales y rara vez en embarcaciones de flotas artesanales.

Preguntas de investigación

Conforme a las problemáticas presentadas, en este estudio se plantean las siguientes preguntas investigación:

1. ¿Cómo se diferencian los ensamblajes de especies que componen las capturas de la pesca artesanal entre los tres puertos en Yucatán?
2. ¿Cuáles son los factores ambientales que caracterizan las zonas de pesca de estos ensamblajes en función de los artes de pesca utilizados?
3. ¿Cómo varía la distribución espacial y temporal de estas zonas potenciales de pesca?

Hipótesis

A continuación, se presentan las hipótesis:

1. Los ensamblajes de especies capturados por la flota artesanal en Yucatán varían entre puertos espacialmente en términos del arte de pesca utilizado.
2. La profundidad, la temperatura superficial del agua y la velocidad de las corrientes caracterizarán las zonas de pesca de los ensamblajes de especies.
3. La distribución espacial de las zonas potenciales de pesca estará determinada por los cambios estacionales de variables ambientales como la temperatura y corrientes.

Objetivos.

Objetivo general:

- Determinar espacial y temporalmente las zonas potenciales de pesca de las especies que caractericen los ensamblajes de especies capturados por la jimba y el buceo.

Objetivos particulares:

- Identificar las especies que caractericen los ensamblajes de especies capturados por la jimba y el buceo con compresor en la pesca artesanal de Yucatán.
- Comparar si existen diferencias en la composición de especies entre los puertos de Sisal, Dzilam de Bravo y Río Lagartos según el arte/método de pesca seleccionado.
- Implementar modelos correlativos para conocer las características ambientales que determinan la idoneidad del hábitat donde son desplegados los artes de pesca por la flota artesanal.
- Determinar las zonas potenciales de pesca de las especies que caracterizan los ensamblajes capturados por la jimba y el buceo a partir de capas mensuales de variables ambientales.

Capítulo 2. Identificación de métiers

2.1 Construcción de los métiers

En el contexto de las pesquerías mixtas donde el pescador puede elegir entre varias especies objetivo, aquellas que son capturadas son resultado de una comunidad ecológica que habita en un sitio dado, donde el pescador tiene acceso a una parte de las especies gracias al método de pesca que emplea (Pelletier & Ferraris, 2000) y a las características del sitio donde se establece la comunidad de especies (Ramírez-Rodríguez & Ojeda-Ruíz, 2012). Aunado a lo anterior, la preferencia económica incentiva al pescador a seleccionar las especies de mayor valor económico (Ulrich *et al.*, 2012).

Añadiendo mayor incertidumbre, la motivación de un pescador para elegir entre áreas y especies, se supondría que es para obtener mayores ganancias, pero esto resulta más complejo porque el pescador debe considerar 1) la incertidumbre inherente a la decisión que tome; 2) los costos que le representa seleccionar entre los distintos sitios de pesca; 3) el riesgo que representa sufrir un accidente de trabajo; 4) las capacidades y experiencia del pescador; 5) las limitantes del método de pesca debido a las condiciones ambientales (Hilborn & Walters, 1992). Por ello es necesario considerar que existe heterogeneidad en las prácticas de pesca, ya que el pescador puede cambiar a lo largo de un año entre las especies objetivo, artes de pesca y ubicaciones, con lo cual la dinámica espacial y temporal que emplea también afectará de forma particular las poblaciones de organismos (Hilborn & Walters, 1992; Pelletier & Ferraris, 2000; Salas & Gaertner, 2004).

El uso de métiers permite identificar operaciones de pesca que comparten ciertas características (el sitio de pesca, el arte de pesca, la temporalidad y la especie objetivo) (Ulrich *et al.*, 2012). Esta formulación de subdivisiones permite comprender cómo se asigna el esfuerzo de pesca de manera más precisa, logrando identificar posibles externalidades que puedan afectar la dinámica de la pesca (Monroy *et al.*, 2010). El análisis de métiers ha reemplazado estrategias de manejo con un enfoque uni-específico implementadas por la Unión Europea, logrando profundizar en la localización del esfuerzo de pesca en regiones y temporadas, distinguiendo las áreas que deben ser administradas para pesquerías multiespecíficas (Iriondo *et al.*, 2010; Ulrich *et al.*, 2012).

En términos espacio-temporales, la importancia de evaluar las pesquerías por métiers se debe a que facilita la comprensión de las interacciones entre el esfuerzo de pesca y el ensamblaje de especies capturadas. Lo anterior permitiría identificar puntos de referencia que ayuden a establecer zonas de refugio pesquero de acuerdo a la temporalidad espacial con la que interactúan artes de pesca y especies, resultando en una reducción en las inconsistencias de la implementación de regulaciones (Ramírez-Rodríguez & Ojeda-Ruíz, 2012).

2.2 Metodología

2.2.1 Diseño experimental

El interés del estudio es identificar la asignación espacial de dicho esfuerzo, para ello es necesario evaluar si la costa de Yucatán debe ser considerada como una sola región o si los recursos varían a lo largo de la costa generando distintos escenarios donde se despliegan los métodos de pesca, por lo tanto, se evaluó si la variación entre las especies capturadas por cada arte fuera distinta entre los puertos a través de un análisis modificado de PERMANOVA y acompañado de análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS, por sus siglas en inglés). Así mismo se conformó un ensamblaje de especies jerarquizado con relación a la abundancia y ocurrencia de cada especie en cada sitio de pesca y método. De este modo se seleccionaron las especies y los sitios para poder desarrollar los modelos de zonas potenciales de pesca (MZPP).

En los MZPP se generaron modelos ensamblados, los cuales se construyen con la selección de algoritmos que hayan presentado un mejor desempeño para clasificar las presencias. La construcción de cada modelo consiste en seis pasos, 1) crear una base de datos con los puntos de pesca y las variables ambientales a evaluar; 2) crear una matriz con la información de los puntos y variables ambientales de pseudo-ausencias para la especie; 3) ejecutar los modelos con todos los algoritmos de modelación seleccionados; 4) evaluar la precisión de los modelos; 5) construir los modelos ensamblados; 6) crear los mapas a partir del modelo ensamblado con mejor evaluación.

2.2.2 Datos

Los datos utilizados en el presente estudio fueron recolectados en los puertos de SI, DB y RL de mayo de 2017 a junio del 2018. Con observadores a bordo de embarcaciones pesqueras, la trayectoria de la embarcación se registró con GPS, en la bitácora se acopió información respecto a la hora del día en la que las embarcaciones realizaban actividades como “traslado”, “búsqueda” y “pesca”. Al momento en que las embarcaciones realizaban la actividad de “pesca” los observadores registraron qué especies fueron capturadas en términos de peso y abundancia.

Las bitácoras de los observadores y las trayectorias registradas con el GPS se asociaron para obtener la posición geográfica en dónde las embarcaciones realizaron sus operaciones de pesca, el arte de pesca que utilizaron en cada viaje, y la temporalidad.

2.2.3 Análisis estadísticos

El estudio se realizó para los artes de pesca de jimba y buceo, para lo cual se consideró unidades de muestreo distintas para cada arte de pesca debido a que operan de forma diferente. En el caso de la jimba la unidad de muestreo fue el lance, el cual consiste en que el pescador despliega su arte de pesca lanzando varias líneas con carnada, dejando que la embarcación sea arrastrada por la corriente (al garete) en la cual se registraron 55 lances en total (26 lances en SI, 16 en RL y 13 en DB). En el caso del buceo la unidad de muestreo fue la inmersión. En este método, cuando se arriba a un sitio de pesca, el buzo desciende mientras que desde la embarcación se le suministra oxígeno con un compresor. De esta manera, el pescador puede realizar inmersiones prolongadas (hasta 2 horas) dependiendo de la disponibilidad de las especies, registrando un total de 243 inmersiones, obteniendo 132 inmersiones en (RL, 62 en DB, y 49 en SI).

Composición de especies capturadas

Para identificar diferencias entre las localidades se realizaron análisis de Escalamiento Multidimensional no métrico (NMDS), para ello se obtuvo una matriz de similitud con el índice de Bray Curtis, utilizando las capturas de las especies. Este método de ordenación

multivariado no paramétrico basado en índices de similitud, realiza una propuesta de ordenación en un plano bidimensional, con las distancias obtenidas a través de una matriz triangular de similitud, dando como resultado una propuesta de ordenación con menor estrés, lo cual permite observar cómo los registros se agrupan o alejan entre sí en un espacio multidimensional (Clarke, 1993). Entre mejor estimación exista entre la distancia original y la obtenida finalmente por el algoritmo, menor será el valor del estrés (Clarke, 1993).

Posteriormente se puso a prueba la estructura de las comunidades de especies registradas en los tres puertos para cada método de pesca en una prueba de permutación de una vía, PERMANOVA, lo cual es utilizado para detectar diferencias entre grupos de muestras multivariadas. El primer paso consistió en comparar las distancias de las observaciones registradas en una matriz de similitud/distancia entre las unidades de muestreo, realizando un análisis de varianzas, donde se contrasta la variabilidad entre grupos y la variabilidad de grupos diferentes usando el estadístico F , con lo cual se detectaron diferencias entre grupos de muestras multivariadas, considerando que diferentes grupos de puntos tienen diferentes ubicaciones del centroide en un espacio multivariado (Anderson, 2001). El segundo paso consiste en obtener el valor de P con pruebas realizadas por permutaciones, generando una nueva distribución del valor del estadístico F , el cual se recalcula para crear un nuevo estadístico, la *pseudo-F* (F^π), con lo cual se logra romper la dependencia de que las variables cuenten con una distribución normal y que las distancias Euclidianas deban ser utilizadas obligatoriamente (Anderson, 2001). El valor de P se calcula de la siguiente manera

$$P = \frac{(\text{Valor de } F^\pi \geq F)}{(\text{Valor total de } F^\pi)}$$

Al realizar el análisis exploratorio de los datos se analizó la homogeneidad de varianzas (Figura 4), donde se constató que el muestreo se encuentra desbalanceado y la heterogeneidad de las varianzas dificulta identificar acertadamente las diferencias entre los grupos, lo cual ejemplifica el escenario del problema de Behrens-Fisher (Anderson *et al.*, 2017)

Distribución espaciotemporal potencial de especies capturadas por la flota artesanal

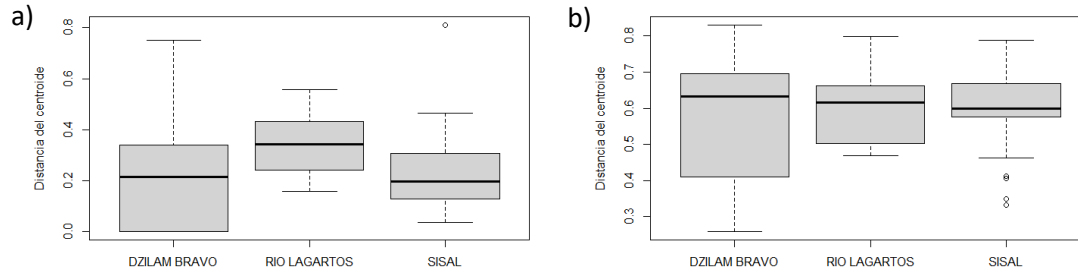


Figura 4. Gráfico de cajas y bigotes donde se observa la homogeneidad de varianzas entre los tres puertos para, a) el arte de pesca jimba y b) el método de pesca buceo.

La prueba de PERMANOVA es sensible a la heterogeneidad en la dispersión multivariada y diseños de muestreo desbalanceados, lo cual incrementa la probabilidad de cometer un error de tipo I (Anderson *et al.*, 2017). Por lo cual se optó por realizar la modificación de PERMANOVA propuesta por Anderson, *et al.*, 2017, donde se plantea una solución al problema de Behrens-Fisher, realizando una modificación al estadístico de *pseudo - F* en la prueba de PERMANOVA, donde se incluye el teorema de Huygen durante la formulación del estadístico de *pseudo - F*, quedando de la siguiente manera:

$$F_2 = \frac{tr(HG)}{\sum_{i=1}^g (1 - \frac{n_i}{N}) V_i}$$

donde $V_i = \sum_{j=1}^{(n-1)} \sum_{j'=(j+1)}^n d_{ij.i,j'}^2 / [n_i(n_i - 1)]$ es el teorema de Huygen, lo cual permite evaluar la dispersión interna del grupo para el grupo i . Con lo cual se reconoce la heterogeneidad potencial mediante la estimación de dispersiones individuales para cada grupo. Por lo tanto, la hipótesis de F_2 estima que el centroide es igual al espacio de la medida de disimilitud escogida, dada las diferencias potenciales en las dispersiones (Anderson *et al.*, 2017). Con ello la prueba reduce la posibilidad de cometer un error de tipo I y permite la evaluación de muestreos desbalanceados (Anderson *et al.*, 2017).

Estas pruebas se realizaron con 999 permutaciones por comparación y utilizando la distancia de disimilitud de Bray-Curtis, la cual es ampliamente utilizada en análisis de ecología (Clarke *et al.* 2006). Con el fin de que se considere a las especies menos abundantes en el análisis se realizó una transformación de todos los datos a través de una raíz cuarta. Para cada arte de pesca, si los puertos no presentaran diferencias en su composición de especies, estos serán tratados como un solo grupo en los análisis siguientes.

Ensamblaje de las especies capturadas

Una vez identificadas las localidades, se requiere obtener una clasificación jerárquica de las especies que conforman el ensamblaje de especies para cada sitio, con la finalidad de identificar cual especie fue la más representativa durante los viajes de pesca realizados por la jimba y el buceo, para finalmente generar la clasificación por métiers. Para realizar la jerarquización de las especies que caracterizan dichos ensamblajes se obtuvo un indicador (IndVal -*Indicator Value*-), el cual realiza comparaciones de ocurrencia y abundancia sobre las especies capturadas por cada arte de pesca en cada localidad, asignando un valor de especificidad (especies que fueron más abundantes), y un valor de fidelidad (especies predominantes) (Dufrêne & Legendre, 1997). El valor obtenido del *Indicator value* se define de la siguiente manera: para cada especie j en cada agrupación de sitios k se registra el producto en dos valores A_{kj} y B_{kj} , donde A_{kj} es la medida de especificidad y B_{kj} es la medida de fidelidad (Dufrêne & Legendre, 1997).

$$A_{kj} = N \text{ individuos}_{kj} / N \text{ individuos}_{+k}$$

$$B_{kj} = N \text{ sitios}_{kj} / N \text{ sitios}_{+k}$$

$$INDVAL_{kj} = 100 A_{kj} / B_{+k}$$

Con los resultados obtenidos Los análisis en esta etapa fueron efectuados con las librerías “vegan” y “labdsv” implementadas en el lenguaje estadístico R.

2.3 Resultados

2.3.1 Especies que caracterizan los ensamblajes de especies capturados por la jimba y el buceo en la pesca artesanal de Yucatán

El arte de pesca de la jimba es ocupado para la captura de pulpo (*O. maya* y *O. vulgaris*) y es altamente selectivo. Sin embargo, los pescadores suelen utilizar un cordel para capturar algunas especies de escama como la mojarra - *Calamus spp.* la rubia - *Lutjanus snagris*, el xcochin - *Balistes capricus* y el jurel - *Caranx hippos* mientras llevan a cabo la pesca de pulpo. La prueba modificada de PERMANOVA mostró diferencias significativas en la composición de especies entre los puertos de SI, DB y RL (Tabla 1). En los resultados obtenidos para el método de pesca de buceo, se encontró que la composición de especies en el puerto de SI fue diferente respecto a los puertos de DB y RL, los cuales no presentaron diferencias entre sí (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados de las pruebas de PERMANOVA modificado para los métodos de pesca jimba y buceo.

Arte de Pesca	Puertos	Pseudo-F	P>F
Jimba	SI – DB – RL	10.47	<0.001
	SI – DB	35.36	<0.001
	SI – RL	5.73	<0.001
	DB – RL	5.69	<0.01
Buceo	SI – DB – RL	11.11	<0.001
	SI – DB	12.56	<0.001
	SI – RL	17.67	<0.001
	DB – RL	2.26	> 0.05

El NMDS para el método de jimba (Figura 5a) mostró diferencias en la composición de especies presentes en los tres puertos, mientras que el método de buceo (Figura 5b) mostró que los puertos de DB y RL son similares en términos de su composición de especies, pero distintos del puerto de SI.

Distribución espaciotemporal potencial de especies capturadas por la flota artesanal

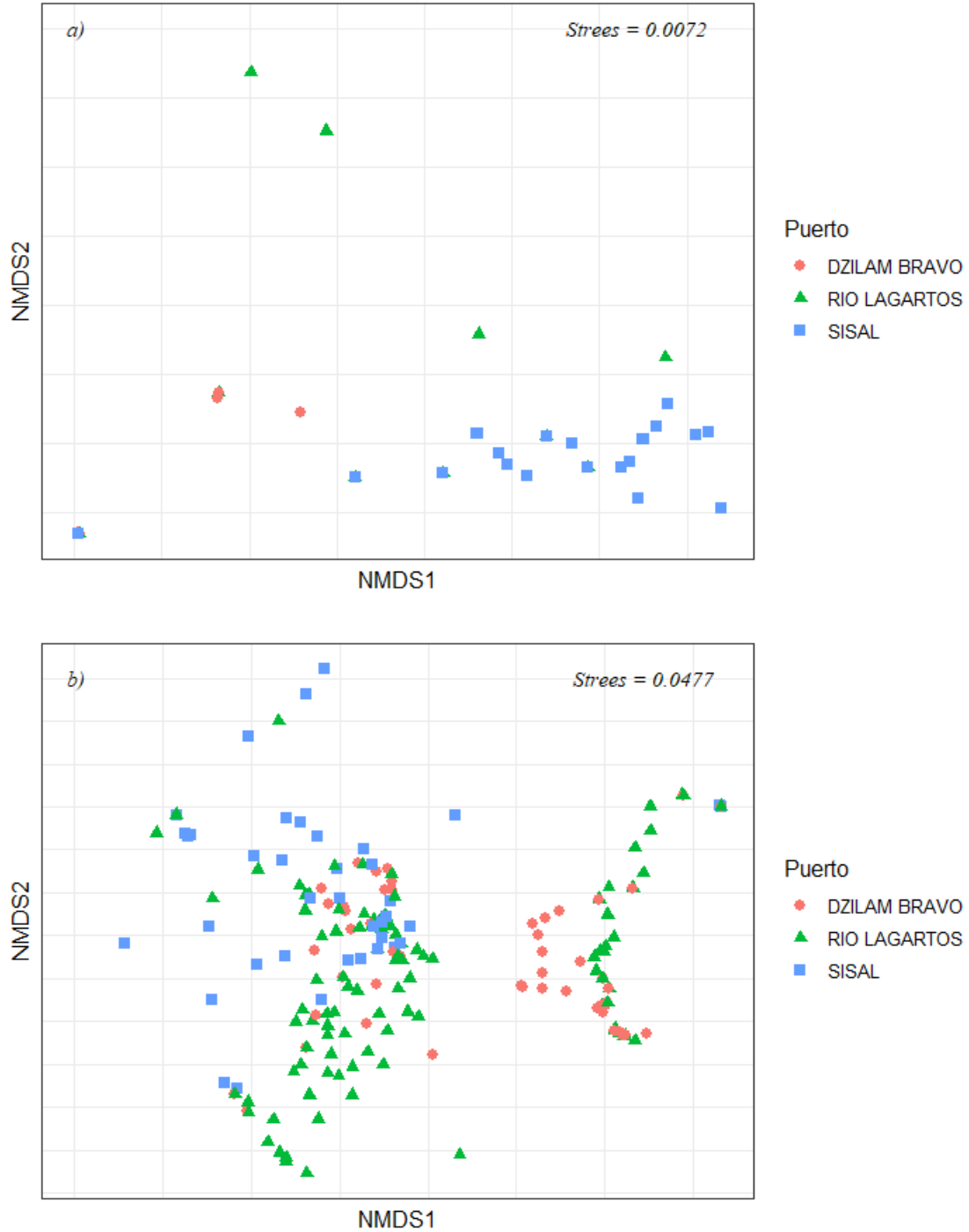


Figura 5. NMDS del método de jimba (a) y buceo (b) para los puertos de Sisal (azul), Dzilam de Bravo (rojo) y Río Lagartos (verde).

El ensamblaje de especies obtenidos con el arte de pesca de jimba en el puerto de SI cuenta con dos especies, en RL con tres especies, mientras que DB sólo se capturó una especie. En

Distribución espaciotemporal potencial de especies capturadas por la flota artesanal

los tres puertos la especie con mayor valor de *Indicator value* fue el pulpo maya *O. maya* (Figura 6) y no comparten entre los puertos ninguna de las especies secundarias.

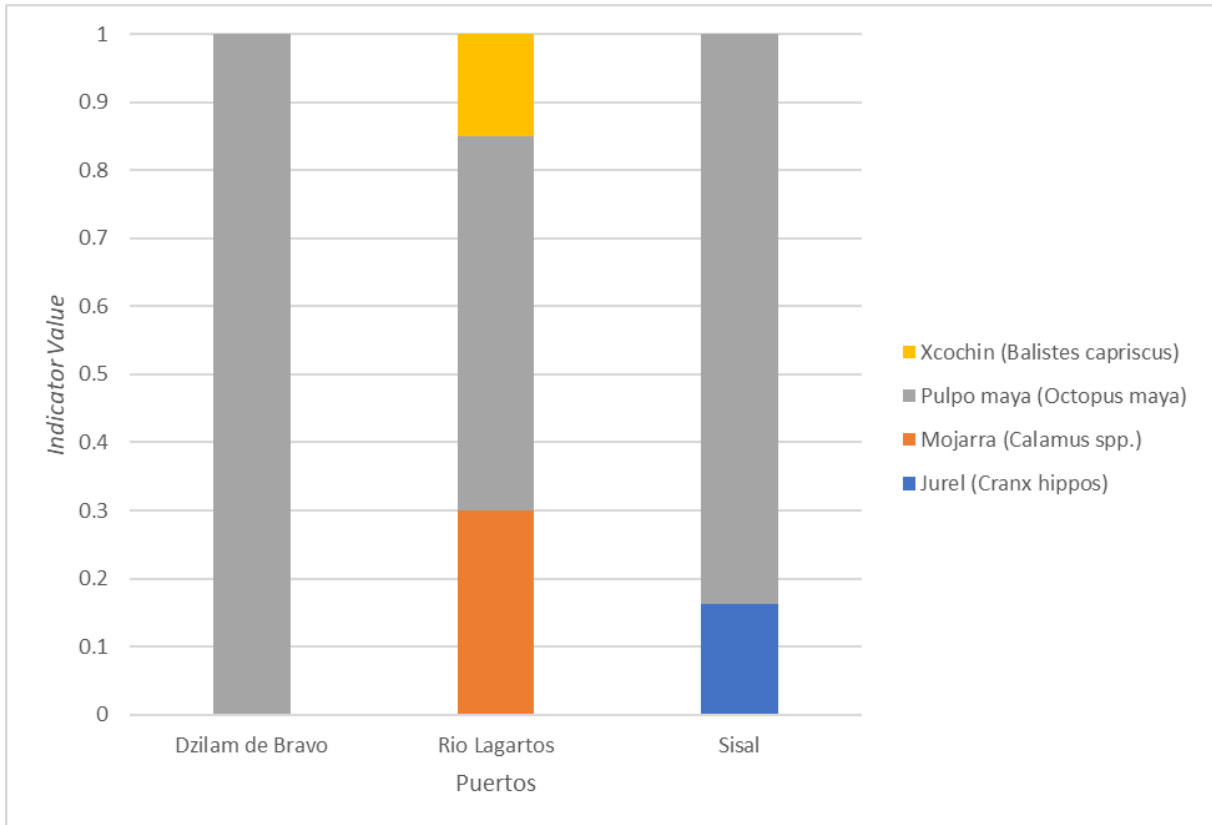


Figura 6. Resultado de *Indicator Value* para las especies capturadas por el arte de pesca jimba en los puertos de Sisal, Dzilam de Bravo y Río lagartos.

Para el método buceo (Figura 7) en el puerto de SI se registraron 11 especies presentando capturas de caracol - *Turbinella angulata*, rubia - *Lutjanus synagris* y jaiba - *Calinectis sapirus* que no se observaron en los otros puertos. El ensamblaje de los puertos DB y RL registró 14 especies con registros de canané - *Ocyurus chrysurus*, esmedregal - *Seriola zonata*, xcochin - *Balistes capriscus*, pulpo maya - *O. Maya*, pargo lunar - *Lutjanus analis* y la cucaracha que no se registraron en SI. Para ambos ensamblajes la especie con mayor valor de *Indicator value* fue el boquinete - *Lachnolaimus maximus*. En el caso de SI la especie que

Distribución espaciotemporal potencial de especies capturadas por la flota artesanal

siguió al boquinete en el *Indicator Value* fue el pargo mulato (*Lutjanus griseus*), para los puertos de DB y RL fue el pepino de mar (*Isostichopus badionotus*).

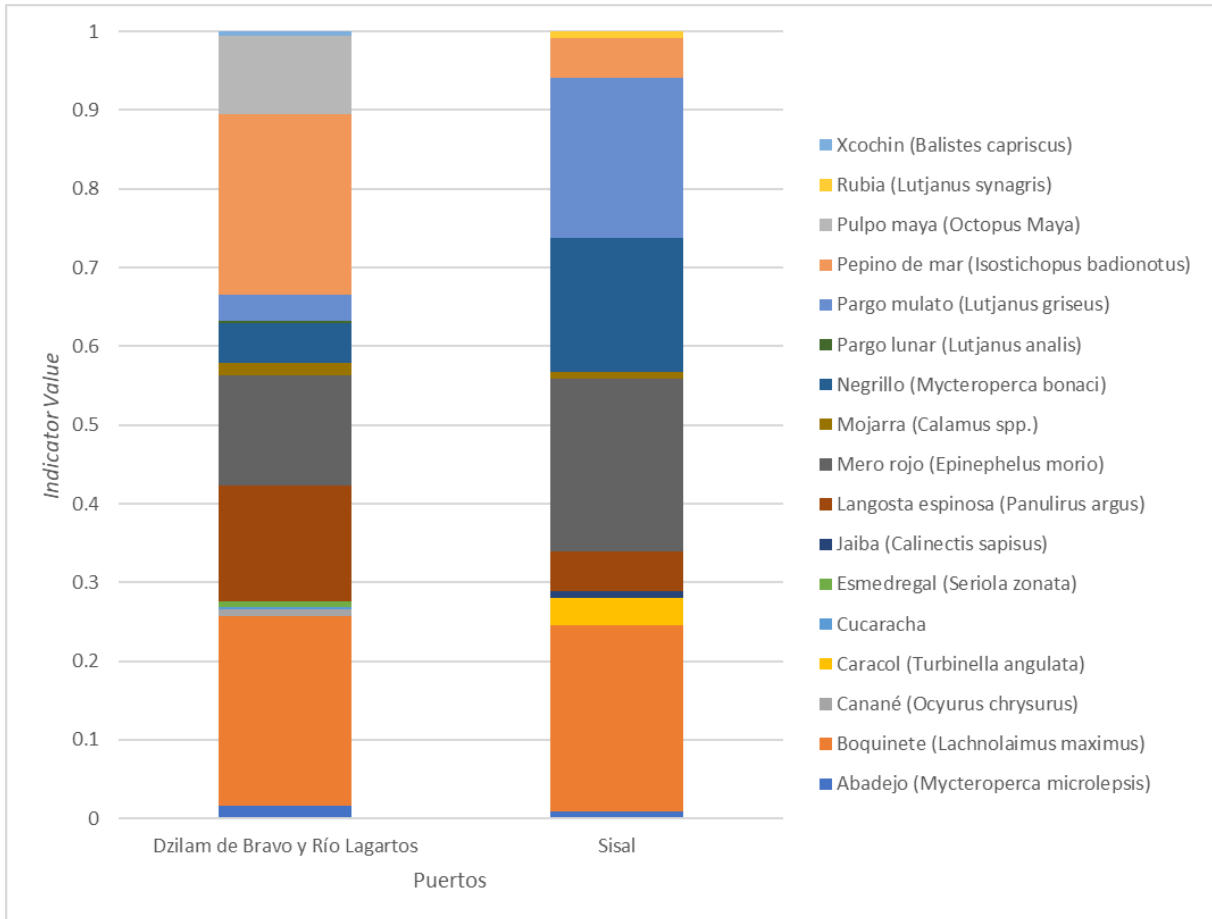


Figura 7. Resultado de *Indicator Value* para las especies capturadas por el arte de pesca buceo en los puertos de Sisal, Dzilam de Bravo y Río lagartos.

De este modo se formaron cinco métiers, tres para el arte de pesca jimba y dos para el método de pesca de buceo (Figura 8): 1) localizado en Río Lagartos con el uso de jimba y la captura de pulpo y mojarra; 2) en Dzilam de Bravo con el uso de jimba y captura de pulpo; 3) en Sisal con la captura de pulpo y jurel a través de jimba; 4) Sisal con buceo capturando boquinete y pargo; 5) Dzilam de Bravo y Río Lagartos capturando boquinete, pepino de mar y langosta con buceo.

Distribución espaciotemporal potencial de especies capturadas por la flota artesanal

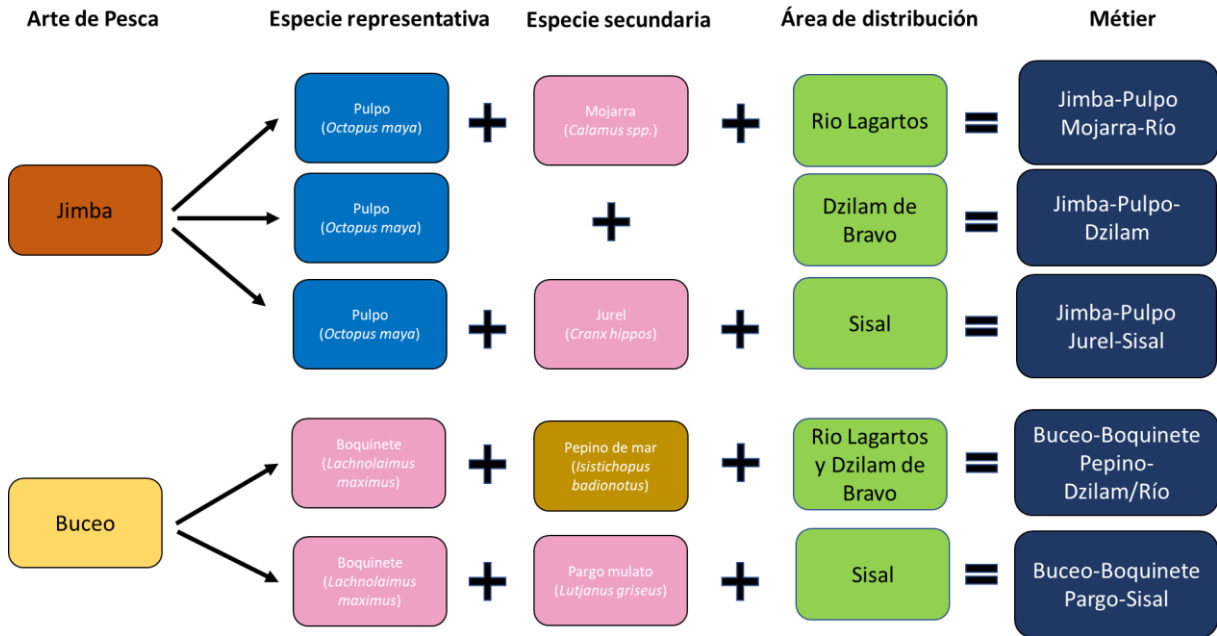


Figura 8. Métiers identificados para los métodos de pesca de Gareteo y Buceo.

Debido a que el pulpo y el boquinete fueron las especies más importantes para la jimba y el buceo respectivamente en todos los puertos, las zonas potenciales de pesca fueron determinadas para estas especies. De esta manera, las proyecciones mensuales obtenidas deberán representar la probabilidad de pesca de estas especies por el arte de pesca que las captura (i.e. jimba, buceo) dadas ciertas condiciones ambientales.

2.4 Discusión

En el escenario de las pesquerías mixtas el pescador desarrolla respuestas adaptativas ante las limitantes impuestas por el clima, los precios en el mercado, las regulaciones (Daw, 2008; Saldaña *et al.*, 2016) esto lo enfrenta cambiando entre artes de pesca, especies objetivo, o sitios de pesca (Salas & Gaertner, 2004). Los métiers permiten identificar las dinámicas asociadas con el arte de pesca y las especies capturadas, comprendiendo cómo suceden las interacciones entre los ensamblajes de especies y el arte de pesca, cómo se enfoca el esfuerzo de pesca en las diferentes localidades y cómo es limitado o favorecido debido a factores ambientales (Andersen *et al.*, 2012; Monroy *et al.*, 2010; Ulrich & Andersen, 2004).

Este trabajo brinda la oportunidad de comparar distintas estrategias en la formación de métiers en el estado de Yucatán. Recientemente en un estudio realizado por Salas, *et al.*, 2019b, se agrupó a través del enfoque de métiers a las pesquerías que se llevan a cabo en la península de Yucatán, en una combinación entre tipo de flota, artes de pesca y especies objetivo. Lo cual estableció una línea base con información sobre las operaciones de pesca en el sureste de México. A pesar de ello, en dicho estudio no se consideró explícitamente cómo operan espacialmente los métiers identificados. En el presente estudio la formación de métiers se aborda a una escala estatal, donde se asocian a dos artes de pesca con el ensamblaje de especies de la localidad, con ello se logra comprender espacialmente la interacción que existe entre el ensamblaje de especies y ambos artes de pesca, encontrando las diferencias en la relación entre los ensamblajes y la operación de los artes de pesca.

La obtención de datos a través de la implementación del programa de observadores a bordo provee de información sensible y precisa sobre la presencia de las especies que mejora la eficiencia de los estudios (Guisan *et al.*, 2019). Sin embargo, el análisis de las pesquerías de pequeña escala representa retos debido a la escasez de información (Branch *et al.*, 2006; Daw, 2008; Saldaña *et al.*, 2016). Su ejecución ocasionalmente genera rechazo por parte de los pescadores quienes niegan el abordaje a las embarcaciones, las condiciones climáticas en ocasiones no permiten salir a navegar y los costos de traslado, alimentación y hospedaje son elevados. Por lo cual la cantidad de información con la que se realizan estos estudios es limitada.

La información colectada durante los viajes de pesca donde usaron el buceo duplica el número de observaciones obtenidas con el uso de jimba, esto se debe a que el uso de la jimba

se restringe a cinco meses, por lo que hubo más oportunidad de realizar viajes cuando se utilizó el buceo. Debido a ello la información de las capturas observadas durante el uso de la jimba reporta pocas especies de escama, es necesario considerar que los resultados obtenidos pueden ser distintos si se aumentara el número de viajes con observadores cuando los pescadores utilizan la jimba.

En el caso de la jimba al ser un arte de pesca selectivo, se sabía que la especie predominante sería el pulpo (Markaida *et al.*, 2017), sin embargo, el pescador suele utilizar el cordel durante el gareteo de la embarcación al momento de desplegar la jimba. Esto mostró que cada puerto obtiene distintas especies a través de esta combinación de artes de pesca, a pesar de que el número de especies que conformaron las capturas fue de cuatro especies (Monroy *et al.*, 2010). Esta combinación de artes de pesca resulta interesante ya que es una forma en que los pescadores tratan de maximizar sus capturas y a su vez sus ingresos. Esto puede deberse a la disminución en la abundancia de pulpo durante la temporada de pesca, por lo que los pescadores deciden utilizar el cordel de forma complementaria para aumentar el volumen de sus capturas, sin embargo, este tipo de estrategias deben ser exploradas con más detalle.

En el caso del buceo se aprecia que el número de especies que componen las capturas es considerablemente mayor al de la jimba a pesar de que el pescador tiene la posibilidad de seleccionar con mayor claridad a su presa. Estos resultados sugieren que decide capturar un mayor número de especies, aunque que no sean su objetivo principal (Coronado & Salas, 2010; López-Rocha *et al.*, 2009). Esto puede deberse a que la estrategia del pescador en este caso es obtener el mayor número de especies con el objetivo de maximizar los ingresos que pueda obtener durante su viaje (Saldaña *et al.*, 2017).

El ensamblaje de especies en el buceo nos permite observar diferencias entre las operaciones de pesca de SI y las que se realizan en RL y DB. Si bien la especie más importante en los tres puertos fue el boquinete, las capturas que se realizan en SI mostraron una dependencia por las especies de escama como lo son el mero rojo y el pargo mulato, mientras que en RL y DB fueron relevantes la langosta y el pepino de mar. Esta información es muy importante ya que los planes de manejo que permiten el uso del buceo autorizan la captura de langosta y de pepino de mar, lo cual invita a reflexionar si el uso de buceo con compresor debiera seguir permitiéndose en el puerto de SI cuando se puede observar a través de este estudio que ninguna de estas dos especies se captura en mayor volumen o frecuencia y se está

promoviendo la captura de escama con un método de pesca no permitido para dicha pesquería. Otra posibilidad es que de manera natural exista un gradiente sobre la distribución de las especies ya que se ha observado en varios estudios que las especies capturadas con mayor tamaño y volumen se encuentran en los puertos de RL y DB, lo cual posiblemente pueda suceder debido a efecto de la surgencia de Cabo Catoche y a los aportes ricos en nutrientes provenientes del anillo de cenotes (Salas *et al.*, 2006; Velázquez-Abunader *et al.*, 2013).

El hecho de que el boquinete (*Lachnolaimus maximus*) sea la especie mejor calificada por la prueba de *Indicator value* es relevante ya que no existe un plan de manejo específico para regular su captura. Este resultado probablemente se debe al decremento en las tasas de captura de mero rojo, el cual históricamente ha sido la especie de mayor importancia del estado (Saldaña *et al.*, 2017), por lo tanto, el actual aprovechamiento del boquinete sugeriría que está supliendo en importancia al mero rojo. Una particularidad del boquinete es que esta especie no suele ser capturada con otros artes de pesca como el cordel o palangre, debido a que se alimenta de pequeños crustáceos, moluscos y erizos de mar (McBride *et al.*, 2008), por lo cual de regularse la captura de esta especie se debe hacer mediante el método de buceo. El haber utilizado el enfoque de métiers en el presente estudio permitió identificar diferentes asociaciones entre las especies capturadas y los artes/métodos de pesca utilizados. A pesar de que la jimba y el buceo son utilizados en las comunidades costeras de Yucatán, y que en la región se capturan las mismas especies, no necesariamente son capturadas en la misma magnitud. Estos resultados van acordes con lo planteado con Salas *et al.* (2019b) en el sentido de que el enfoque de métiers puede facilitar la evaluación de los efectos que ciertos artes de pesca tienen en un grupo de especies, por ende, definir protocolos de monitoreo para evaluar el desempeño de los métiers y potenciales cambios en caso de que sucedan.

Capítulo 3. Determinación espacio-temporal de zonas potenciales de pesca

3.1 Modelación espacio-temporal de las pesquerías

Las interacciones existentes entre el esfuerzo de pesca, las variables ambientales y la distribución de los organismos, has sido poco estudiada, debido a su complejidad. Sin embargo, ante las necesidades impuestas por el calentamiento global, las interacciones de diversos sectores productivos en los ambientes marinos y los objetivos de gestionar sustentablemente las pesquerías artesanales, se vuelve imperante identificar los espacios geográficos y la temporalidad en que se lleva a cabo la actividad pesquera a nivel local y regional. Con el objetivo de ordenar a todos los usuarios y todas las actividades productivas que se desarrollan en el espacio marítimo, construyendo un balance entre el cuidado del medio ambiente, desarrollo social, desarrollo económico y la gobernanza (Meaden *et al.*, 2016).

Ante este escenario, existen diversas herramientas que permiten realizar el análisis espacial de la actividad pesquera, como lo son: i) los sistemas de información geográfica (SIG), los cuales pueden mejorar la capacidad de análisis en grandes volúmenes de datos y crear imágenes claras de datos espaciales; ii) la percepción remota, en la cual se puede analizar información obtenida a través de sensores remotos, instalados en satélites, aeronaves o drones, los cuales registran de manera continua diversas variables marinas y terrestres; iii) sistemas de modelación y predicción del oceano, los cuales se generan resolviendo complejas ecuaciones matemáticas considerando las acciones combinadas de la fuerza de gravedad y la rotación de la tierra, para predecir las dinámicas de las corrientes marinas, la temperatura, la salinidad y el nivel del mar (Meaden *et al.*, 2016). La implementación de estas herramientas tecnológicas en combinación con el creciente desarrollo en el procesamiento analítico de la información, permite implementar algoritmos que sirven para identificar patrones en grandes volúmenes de datos, elaborando complejas predicciones espacio-temporales (Thuiller *et al.*, 2009).

3.1.1 Modelos correlativos

Los modelos correlativos han sido ampliamente utilizados en contextos terrestres y acuáticos con aplicaciones en 1) evaluaciones regionales de biodiversidad; 2) conservación espacial; 3) biología evolutiva; 4) epidemiología; 5) cambio global; y 6) manejo de vida silvestre (Araújo & Peterson, 2012). Los modelos correlativos son implementados a partir de distintos algoritmos, entre los más utilizados se encuentran: 1) Maxent (*Maximum entropy*), 2) *Generalized Linear Models* (GLM), 3) *Generalized Additive Models* (GAM), 4) *Boosted Regression Trees* (BRT), 5) *Support Vector Machine* (SVM), 6) *Classification and Regression Trees* (CART), 7) *Multivariate Adaptive Regression Splines* (MARS), 8) *Mixture Discriminant Analysis* (MDA), 9) *Random Forests* (RF), 10) *Artificial Neural Networks* (ANN), 11) *Environmental Niche Factor Analysis* (ENFA), 12) Bioclim, 13) Domain, 14) Mahalanobis, 15) *Bayesian Hierarchical Modeling con integrated nested Laplace approximation* (INLA), y 16) *Non-Parametric Probabilistic Environmental Niche Model* (NPPEN). Adicionalmente, se pueden construir modelos ensamblados a partir de algoritmos individuales como los mencionados anteriormente (Araújo & New, 2007). Si bien existen diversos enfoques de modelado, los modelos correlativos representan una herramienta valiosa en la toma de decisiones ambientales.

Al desarrollar algunas técnicas de modelación se requiere que los datos de las especies tengan presencias y ausencias, sin embargo, es difícil determinar si las ausencias son verdaderas o falsas, ya que pueden generarse debido: i) a un error o sesgo en el tipo de muestreo (metodológicas), ii) que a pesar de existir las condiciones ambientales idóneas, la especie no pueda acceder a ese lugar por limitaciones en su dispersión, factores históricos, extinciones locales, interacciones bióticas (ambientales), por último, iii) que existan fronteras ambientales entre distintos sitios, que limiten el acceso de la especie (contingente) (Lobo *et al.* 2010).

Particularmente en el caso de los datos obtenidos por la pesca, puede ser que una especie estuviera presente pero no haya sido capturada debido a que el pescador no la observó, el organismo no fue atraído por el método de pesca o se escondió, etc. En esta situación, cuando no se cuenta con ausencias verdaderas, se sugiere implementar la generación aleatoria de pseudo-ausencias, a fin de que se puedan utilizar las diferentes técnicas de modelación. Existen diferentes estrategias para su selección, i) el tipo de modelo a utilizar, ii) el método de generación de las pseudo ausencias (sesgo ambiental o geográfico), iii) el número de

pseudo-ausencias, iv) la cantidad de permutaciones del modelo (Barbet-Massin *et al.*, 2012). Las características en la construcción de la matriz de pseudo ausencias afecta la precisión y sensibilidad del modelo (Barbet-Massin *et al.* 2012).

Los estudios donde se han utilizado modelos de correlación en el contexto de las pesquerías son principalmente en las pesquerías industriales, en el caso de las pesquerías artesanales de países en desarrollo son escasos los trabajos realizados (e.g. Torres-irineo *et al.*, 2014; Damasio *et al.*, 2020; Torres-irineo *et al.*, 2021). A nivel mundial, las comunidades que dependen de pesquerías artesanales afrontan una variedad de problemáticas (sobrepesca, contaminación, degradación de hábitat, cambio climático, huracanes, etc.), que han ido diezmando la biodiversidad de las especies y por tanto la sostenibilidad de los recursos pesqueros. El uso de múltiples artes de pesca, la disponibilidad espacio-temporal de las especies, así como la demanda del mercado y aspectos socio-económicos y ambientales definen la dinámica de la pesca (Salas & Gaertner, 2004). Esta complejidad, ligada a la alta incertidumbre en la actividad y dada la naturaleza dispersa del sector pesquero, limita la capacidad para la colecta y análisis de datos generando un gran desafío para la evaluación y manejo de pesquerías artesanales (Saldaña *et al.* 2017).

3.2 Metodología

Para conocer las características ambientales que determinan la idoneidad del hábitat de las especies seleccionadas en el capítulo anterior se desarrollaron MZPP de dos métiers (JPuY y BBoY). El proceso de modelación se basó en correlacionar las presencias de las especies de interés con datos ambientales en los sitios de captura. La generación de pseudo-ausencias se realizó a través de la plataforma de BIOMOD, con la cual se creó una matriz con 200 puntos de pseudo-ausencias y tres réplicas con el método de sesgo espacial, el cual consiste en asegurarse de que las pseudo-ausencias no coincidían espacialmente con los puntos de presencia, para ello se creó una capa base donde se eliminaron las coordenadas en que se registraron las presencias y posteriormente se asignó la información ambiental asociada a cada coordenada de pseudo-ausencia.

3.2.1 Variables ambientales

Las variables ambientales que se consideraron para la construcción de los modelos fueron la temperatura superficial (T) y del fondo marino (TD), velocidad de las corrientes superficial (V) y del fondo marino (VD) y la distancia a la línea de costa (D). Las variables V, VD, T, TD se obtuvieron de los modelos de circulación marina disponibles en HYCOM (<https://www.hycom.org/>) a una escala diaria para los años 2017 y 2018, con una resolución de 4 km. La profundidad (Z) se obtuvo con una resolución de 450 m (15 segundos arco) de la base de datos de batimetría disponible en la Carta Batimétrica General de los Océanos (GEBCO por sus siglas en inglés; <https://www.gebco.net/>). La distancia a la costa se calculó para cada píxel de las capas ambientales y se obtuvo la distancia más cercana a la costa. Con la capa de distancia se delimitó el área de evaluación de los modelos a una distancia de 90 km de la costa. Partimos del supuesto de que estas variables están involucradas en la interacción de los artes de pesca y las especies, es decir, T, TD son variables que se vinculan con las especies, mientras que V, VD, Z y D influyen en la operación de pesca.

Para obtener los datos ambientales de las capturas se realizó una selección de los puntos de pesca obtenidos a través de los registros de GPS de cada viaje, con estos puntos se extrajo la información espacial de las distintas variables ambientales, en el caso de la D y la Z el registro fue sobre una capa “raster” única y para las capas S, SD, T, TD, V, VD, MLD, la extracción fue seleccionada del día que se realizó el viaje.

3.2.2 Modelo climático HYCOM

El modelo climático de HYCOM es una representación matemática de la circulación general del océano, el cual representa movimientos de corrientes marinas y las mezclas de variables fisicoquímicas como la salinidad y temperatura en una matriz tridimensional donde se representan las coordenadas geográficas y la elevación. Es una herramienta que permite comprender y predecir el comportamiento del océano en una escala de tiempo diaria y a una resolución espacial de cuatro kilómetros, la cual se caracteriza por proyectar procesos de estratificación en la columna de agua (HYbrid Coordinate Ocean Model, 2020). Estos modelos matemáticos son constantemente supervisados por un grupo científico que evalúa y ajusta las predicciones para reducir la incertidumbre y mejorar la precisión de los resultados con información tomada in situ y a través de observaciones satelitales. Debido a ello las

predicciones obtenidas a través del modelo HYCOM ofrecen proyecciones sobre la circulación del océano lo suficientemente confiables como para utilizarlas en diversos estudios y obtener una mayor comprensión de los procesos oceánicos actuales y futuros (HYbrid Coordinate Ocean Model, 2020).

La estructura vertical de las variables proporcionadas por el modelo de HYCOM permite obtener los valores de SD, VD, TD y MLD, lo cual representa una gran oportunidad para evaluar las condiciones ambientales que se encuentran en el fondo de la plataforma continental, lo cual es de suma importancia debido a que la mayoría de las especies capturadas para este estudio son demersales. La adición de este tipo de variables con la información de la columna de agua ha demostrado mejorar el rendimiento predictivo de los modelos correlativos en este contexto (Brodie *et al.*, 2018).

3.2.3 Evaluación de modelos

Los MZPP fueron construidos en la plataforma BIOMOD (Thuiller *et al.*, 2009) del lenguaje de programación R, en la que se ejecutan la mayoría de las técnicas de modelación mencionadas anteriormente. La evaluación de los modelos se realizó ejecutando diferentes métricas como el área debajo de la curva (AUC por sus siglas en inglés), el coeficiente kappa de Cohen (Kappa) y el *True skill statistic* (TSS). Estas métricas presentan ventajas y desventajas para validar a los MZPP, dependiendo de la métrica, los modelos con valores arriba de 0.7 son considerados con buena precisión (Guisan *et al.*, 2019). Adicionalmente, en BIOMOD es posible construir modelos ensamblados, los cuales han demostrado mejorar la precisión de los modelos (Thuiller *et al.*, 2009). Los modelos ensamblados se generaron a partir de los modelos construidos en una primera parte dentro de BIOMOD, es decir, modelos como GLM, GAM, GBM, MARS, RF, CTA, MaxEnt, entre otros (Tabla 2).

Tabla 2. Lista de modelos disponibles en la paquetería BIOMOD 2 del lenguaje de programación R.

Tipo de modelado	Acrónimo	Modelo
Modelo de Regresión	GLM	<i>Generalized Linear Models</i>
Modelo de Regresión	GAM	<i>Generalized Additive Models</i>
Modelo de Regresión	MARS	<i>Multivariate Adaptive Regression Splines</i>
Aprendizaje de maquina	GBM	<i>Generalized Boosting Model</i>
Aprendizaje de maquina	ANN	<i>Artificial Neural Networks</i>
Aprendizaje de maquina	RF	<i>Random Forests</i>
Aprendizaje de maquina	MaxEnt	<i>Maximum Entropy</i>
Modelo de envoltura	SRE	<i>Surface Range Envelope</i>

Modelo de Clasificación	CTA	<i>Classification Tree Analysis</i>
Modelo de Clasificación	FDA	<i>Flexible Discriminant Analysis</i>

Basados en el umbral de alguna de las métricas de validación de estos modelos se seleccionaron aquellos modelos que rebasaron dicho umbral para poder construir los modelos ensamblados. BIOMOD tiene seis tipos de algoritmos para generar los modelos ensamblados: 1) Promedio de las probabilidades (PP); 2) Coeficiente de variación de las probabilidades (CVP); 3) Intervalos de confianza de la probabilidad promedio (ICPP); 4) Mediana de las probabilidades (MP); 5) Acuerdo promedio de los modelos (APM); y 6) Promedio ponderado de las probabilidades (PPP). El modelo ensamblado seleccionado fue aquel que presentó los valores más altos en sus correspondientes métricas de evaluación.

3.2.4 Determinación de las zonas potenciales de pesca.

En esta etapa se realizaron mapas predictivos de la distribución potencial de las especies seleccionadas. Cabe aclarar que debido a la intrínseca relación entre la especie y el arte de pesca (la jimba y el buceo), se asumirá que dicha distribución potencial estará restringida al arte de pesca utilizado y no en términos estrictamente ecológicos. De acuerdo con el modelo seleccionado, se construyeron capas ambientales a nivel mensual, se consideró un periodo de dos años para obtener la información de dichas variables en los sitios mencionados anteriormente, el área espacial se encuentra delimitado a 70 km de la costa y 70 m de profundidad. Teniendo como resultado una capa promedio por variable/mes, adicionalmente se evaluó que las variables ambientales no presentaran valores elevados de correlación entre ellas, resultando que la SD, TD y Z generalmente presentaron altos niveles de correlación, aunque esto cambió dependiendo el mes del año, por lo cual se evaluaron en distintos grupos con la finalidad de encontrar la combinación de variables que mejor evaluación obtuviera. Estas capas fueron utilizadas para realizar mapas que muestren la distribución potencial espacio-temporal del esfuerzo de pesca, ejercido a una especie objetivo. Para la gestión de las capas ambientales se utilizó la librería “raster” del lenguaje R y el programa MatLab.

3.3 Resultados

3.3.1 Evaluación y proyección de los modelos de distribución de especies

Se desarrollaron dos MZPP, en los cuales se implementaron los modelos GLM, GBM, GAM, CTA, ANN, FDA, MARS, RF, al ejecutar los MZPP se seleccionaron aquellos modelos con un valor de TSS > 0.6 , y para determinar el mejor modelo ensamblado se seleccionó la mayor evaluación de TSS, AUC y Kappa (Tabla 3), en este caso ambos modelos ensamblados (ICPP y APM) tienen un valor mayor a 0.7 en las métricas de evaluación.

Tabla 3. Resultados de las métricas de evaluación para los modelos ensamblados

MZPP	Kappa	AUC	TSS	M. Ensamblado
JPuY	0.808	0.963	0.893	ICPP
BBoY	0.740	0.934	0.746	APM

El modelo JPuY cuenta con 50 presencias y 100 pseudo ausencias, las cuales fueron elegidas de forma aleatoria con un sesgo espacial de 4km de cualquier punto de presencia, las variables que se ocuparon fueron D, V, VD, TD, T, las cuales se observaron entre los rangos descritos en la tabla 4, el algoritmo mejor evaluado para el ensamblaje fue el ICPP. En el caso del modelo BBoY se incluyeron 93 presencias y 149 ausencias, estas ausencias se registraron durante el tiempo de muestreo al momento en que el pescador realizaba una inmersión y no reportaba capturas de boquinete, la combinación de variables seleccionada fueron D, TD, VD, las cuales se observaron entre los rangos descritos en la tabla 4. El algoritmo mejor evaluado para el ensamblaje de modelos fue el APM.

Tabla 4. Rango de variables de importancia para los modelos JPuY y BBoY

MZPP	Variable	Valor minimo	Valor maximo	Promedio
BBoY	Distancia (km)	1.51	29.47	13.73
	Temperatura demersal (°C)	22.92	29.44	26.86
	Velocidad demersal (m/s)	0.00	0.22	0.05
JPuY	Distancia (km)	0.56	19.56	10.42
	Temperatura superficial (°C)	24.28	27.30	29.85
	Temperatura demersal (°C)	5.01	29.49	23.76
	Velocidad superficial (m/s)	0.00	0.17	1.21
	Velocidad demersal (m/s)	0.00	0.53	0.16

3.3.2 Modelo de zona potencial de pesca para el pulpo capturado con jimba

Las curvas de respuesta funcionales de las variables revelan cuál es la relación que existe entre la localización del esfuerzo de pesca y dicha variable, donde se muestra cómo incrementa o disminuye la probabilidad cuando la variable se encuentra en un valor específico, para el caso de modelo JPuY fueron cinco variables (Figura 9).

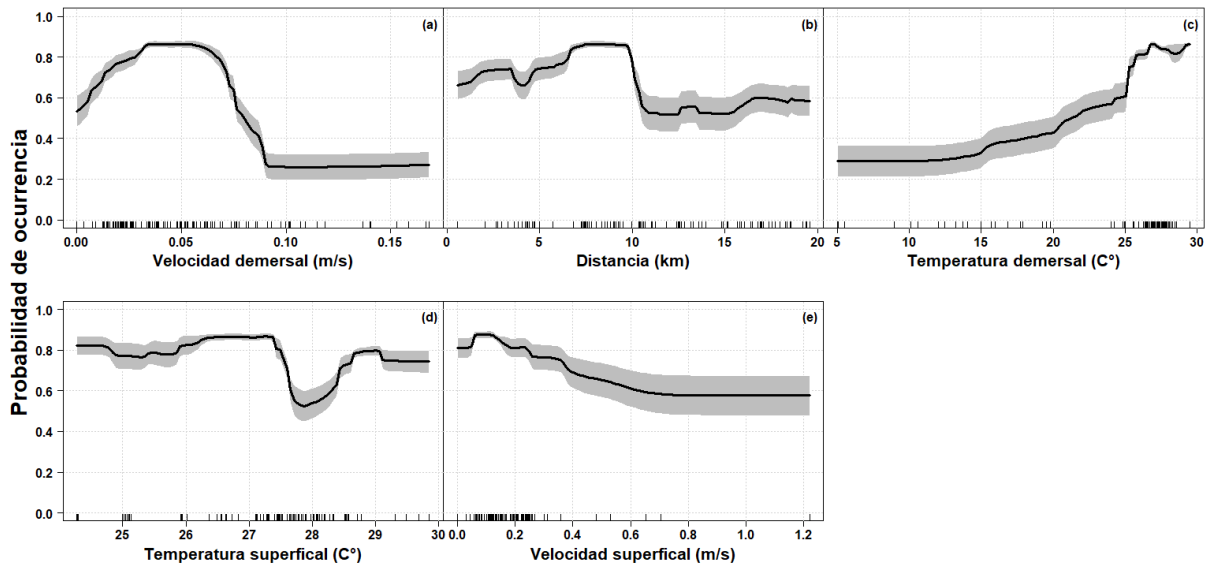


Figura 9. Gráficos de respuestas funcionales de las variables predictivas para la captura de pulpo con el arte de pesca de jimba.

La velocidad demersal (Figura 9-a) es la variable más importante, donde se observa la velocidad en que la probabilidad de ocurrencia es mayor al 80%, esta se encuentra entre los $0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ y $0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, disminuyendo drásticamente al 20% cuando la velocidad incrementa a más de $0.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. La segunda variable es la distancia (Figura 9-b) en la cual la probabilidad siempre se encuentra por arriba del 50%, mostrando las probabilidades de ocurrencia más alta entre 7 y 10 km de distancia, donde las probabilidades son del 85% y disminuyen al 50% después de los 10 km. La temperatura demersal (Figura 9-c) presenta un rango amplio de temperaturas, que varía desde los 5°C hasta los 30°C , mostrando tres probabilidades de ubicación del esfuerzo (baja, intermedia y alta), la baja probabilidad va desde los 5°C hasta los 15°C con un 30% de probabilidad de ocurrencia, la intermedia va desde los 15°C hasta los 25°C , con probabilidades que incrementan de 30% hasta 60% y por último la alta, que registra las mayores probabilidades de 25°C hasta 30°C con probabilidades de captura superiores al 80%. La temperatura superficial (Figura 9-d) tiene un menor rango

Distribución espaciotemporal potencial de especies capturadas por la flota artesanal

entre 24°C y 30°C, donde se observan generalmente probabilidades de ocurrencia superiores al 80%, salvo por el rango de temperatura de 27.5°C y 28.5°C, donde las probabilidades disminuyen hasta un 50%. Por último, la velocidad superficial (Figura 9-e) la cual presenta la menor probabilidad de ocurrencia cuando la velocidad es superior a 0.6ms⁻¹ y es del 60% y su mayor probabilidad es cuando la velocidad es casi nula en el rango de 0 a 0.2ms⁻¹ donde la probabilidad es mayor al 80%.

En la proyección del modelo JPuY se puede observar a escala de tiempo mensual la probabilidad que existe de que una embarcación artesanal que utilizó el arte de pesca jimba para capturar pulpo (Figura 10).

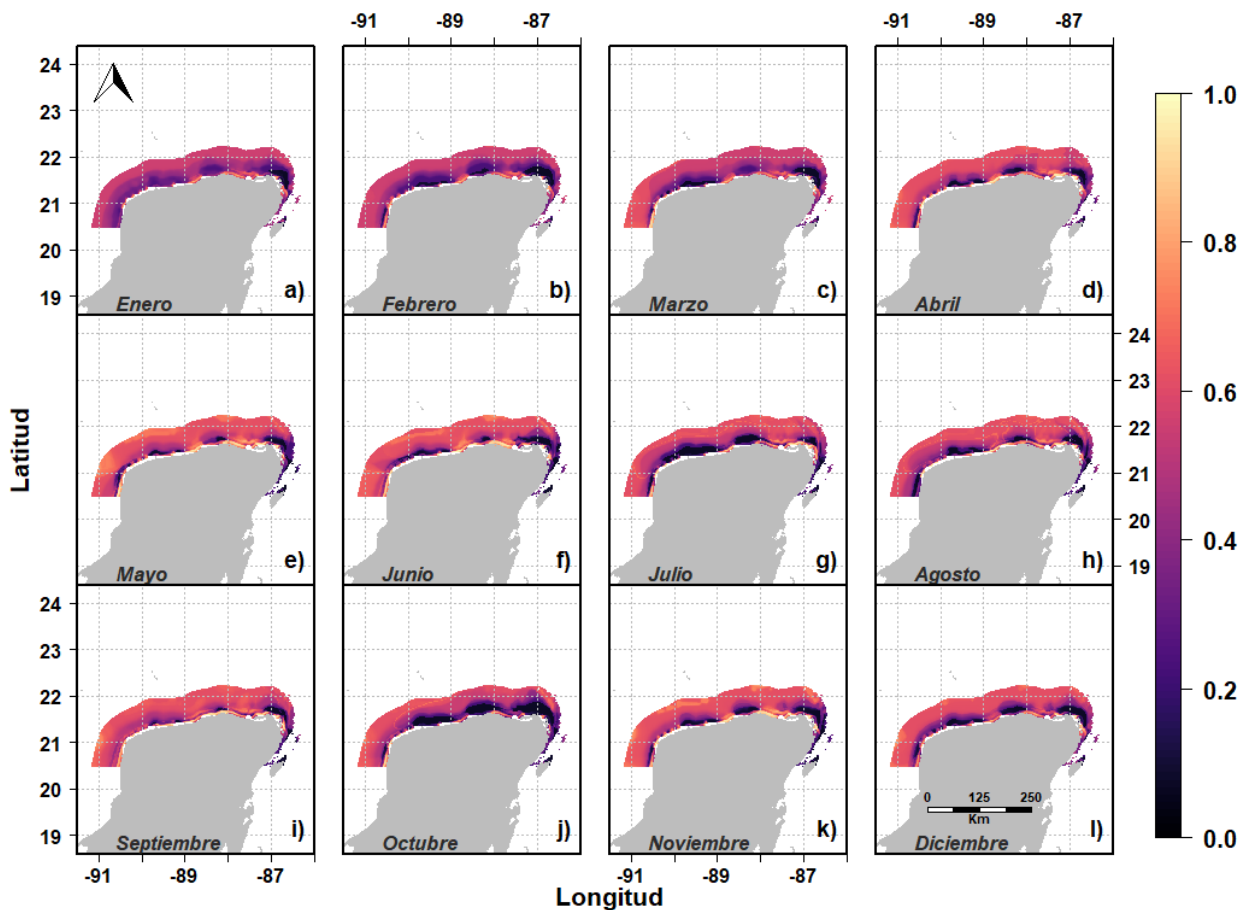


Figura 10. Proyecciones mensuales de MZPP "JPuY". La escala de colores representa las probabilidades de una zona potencial de pesca de pulpo por medio de la jimba. Colores cálidos representan mayor probabilidad, colores fríos menor probabilidad.

De manera general, se observa que durante todo el año y de manera consistente, existen pequeñas franjas donde la probabilidad es mayor al 80%, las cuales se encuentran en zonas

cercanas a la costa y a los puertos, indicando puntos delimitados donde se puede ubicar el esfuerzo de pesca. Las zonas intermedias cercanas a la costa entre los puertos de SI, DB, RL y la zona cercana a Cabo Catoche son los espacios donde la probabilidad es menor, incrementando gradualmente en las zonas lejanas a la costa. En la zona del Mar Caribe el espacio para focalizar el esfuerzo de pesca es reducido durante todo el año, con excepción de pequeñas áreas cercanas a la costa. Al analizar los cambios mensuales se pueden observar algunos meses (Figura 10 a, b y c) cuando la probabilidad se reduce a zonas muy específicas mientras que en otros meses (Figuras 10 e, f y k) se incrementan considerablemente la probabilidad de los espacios donde podría ubicarse el esfuerzo de pesca, debido a las características de las condiciones ambientales.

3.3.3 Modelo de zona potencial de pesca para el boquinete capturado con buceo

En el caso del modelo realizado para el boquinete capturado con buceo (Figura 11), se analizaron tres variables ambientales las cuales aparecen por orden de importancia. La primera gráfica muestra la respuesta de la distancia de la costa (Figura 11-a) en la cual las menores probabilidades de ocurrencia están por debajo de los 10 km y a partir de los 18 km, la probabilidad de ocurrencia aumenta, manteniéndose por encima del 60% hasta los 40 km. La temperatura demersal (Figura 11-b) donde se observa que la máxima probabilidad sucede de manera constante entre los 23° y 26.7°C presentando una drástica disminución para alcanzar la mínima probabilidad a los 27.5°C y volviendo a incrementar después de 28°C para alcanzar la máxima probabilidad a los 30°C. La velocidad demersal (Figura 11-c) presenta la mayor probabilidad cuando no hay movimiento en el fondo y disminuye la probabilidad cuando incrementa la velocidad manteniéndose en su mínimo al llegar a 0.14ms^{-1} .

Distribución espaciotemporal potencial de especies capturadas por la flota artesanal

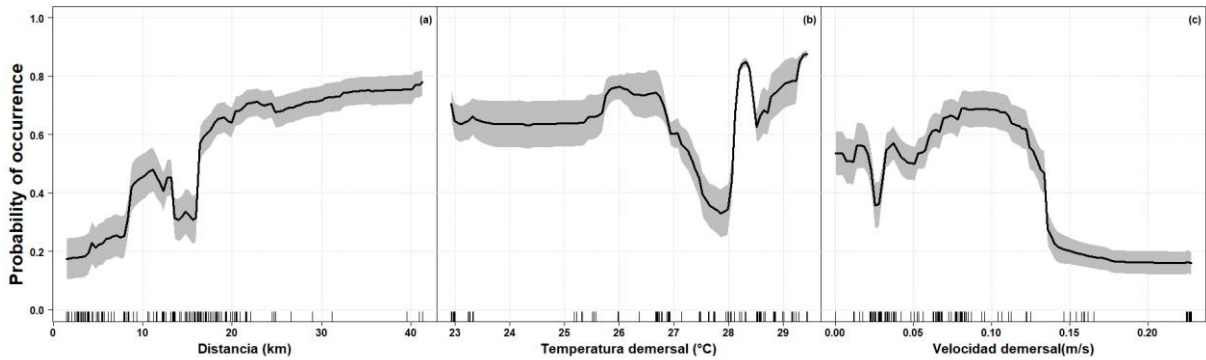


Figura 11. Gráficos de respuestas funcionales de las variables predictivas para la captura de Boquerón con el método de pesca de buceo.

Las proyecciones del MZPP obtenidas para el boquerón con el método de buceo (Figura 12) muestran que el espacio donde se puede ubicar el esfuerzo de pesca para capturar boquerón es muy amplio a lo largo de todo el año. Las zonas donde disminuyen la probabilidad de la ubicación del esfuerzo pesquero se encuentran en los sitios cercanos a la costa y una parte de la zona del Mar Caribe.

A nivel mensual se observa que durante todo el año el esfuerzo de pesca cuenta con una gran probabilidad en toda la costa de Yucatán, siendo los meses de marzo a junio (temporada de secas) y septiembre (Figuras 12 c, d, f, j, i) los meses con mayor probabilidad por área para ejercer el esfuerzo de pesca sobre boquerón. Durante los meses de enero y febrero (Figura 11 e, f) disminuye ligeramente la probabilidad en algunas áreas. Sin embargo, los meses de julio, agosto y octubre (Figura 11 g, h, j) son los meses donde se presentan las menores probabilidades para ubicar el esfuerzo de pesca.

Distribución espaciotemporal potencial de especies capturadas por la flota artesanal

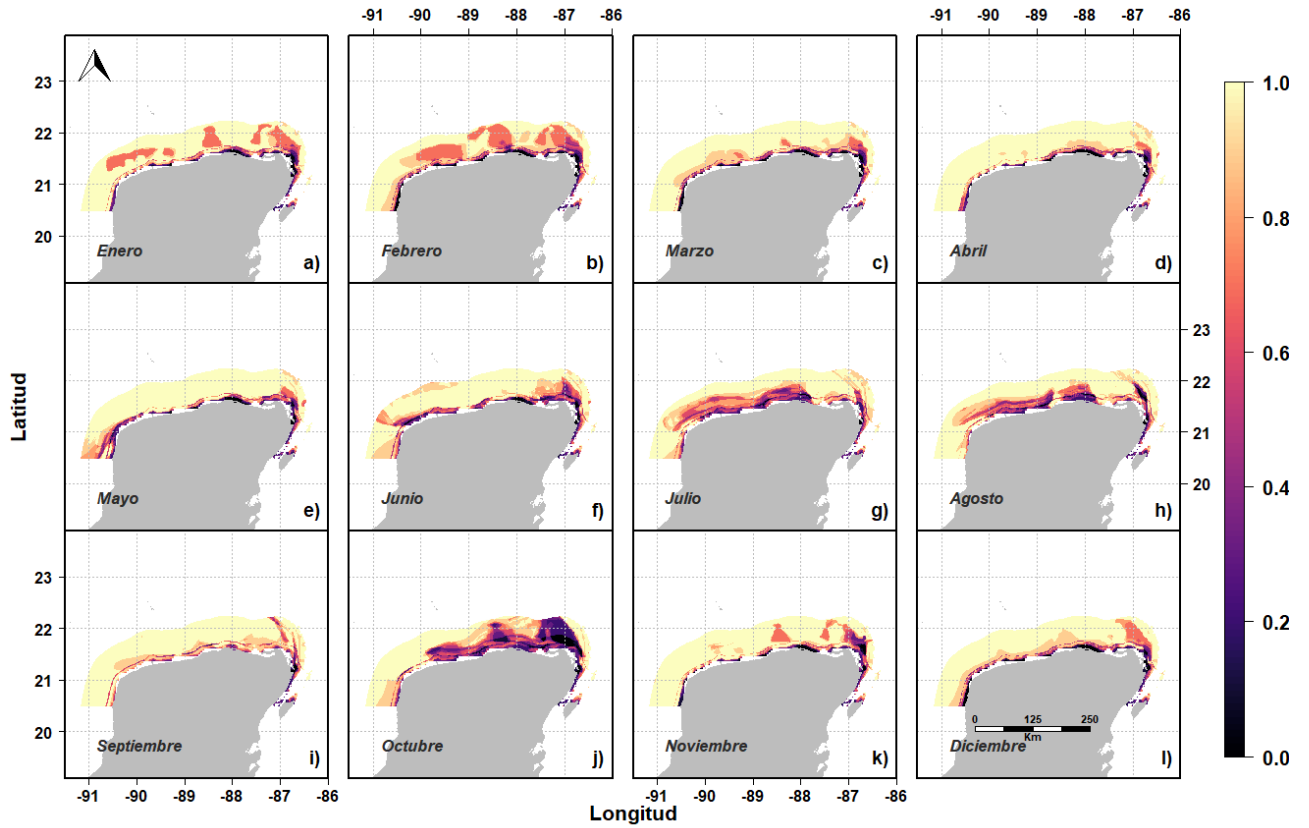


Figura 12. Proyecciones mensuales de MZPP “BBoY”. La escala de colores representa las probabilidades de una zona potencial de pesca de boquinete por medio del buceo. Colores cálidos representan mayor probabilidad, colores fríos menor probabilidad.

3.4 Discusión

Los MZPP permiten comprender en una escala espacio-temporal la distribución del esfuerzo de pesca, pero requieren ser ejecutados con capas de información extensas y a la mejor escala espacial y temporal disponible. La existencia de información remota, a través de imágenes satelitales o modelos climáticos, hace posible la ejecución de los MZPP (Guisan *et al.*, 2019; Naimi & Araújo, 2016; Peterson *et al.*, 2011). Adicionalmente la implementación de variables ambientales de la columna de agua permite identificar cómo la distribución de las especies sucede desde un enfoque tridimensional (Brodie *et al.*, 2018). La estrategia de incluir variables ambientales que expresan la dinámica de los procesos que suceden en el océano, no sólo se limita a la generación de los MZPP, también es una herramienta que permite explorar la complejidad de los procesos marinos y ayuda a interpretar los resultados obtenidos por los MZPP (Anexo 1), lo cual abre una oportunidad de análisis para otros estudios que aporten información valiosa al manejo marino-costero y la conservación de especies (Brodie *et al.*, 2018).

Los modelos ensamblados mostraron un mejor desempeño respecto a los modelos individuales, mejorando las métricas de evaluación. El uso de variables obtenidas del modelo oceánico HYCOM resultan de alta importancia para entender la potencial distribución de especies objetivo ya que éstas son principalmente demersales. De esta manera, se pudo trabajar con variables que no pueden ser obtenidas a partir de imágenes satelitales. Se espera que variables ambientales como la temperatura afecten la distribución de la especie mientras que la velocidad de las corrientes y la distancia expliquen los procesos en la operación de cada arte de pesca.

Con la identificación de los métiers se encontraron diferencias en la forma de operar de ambos métodos de pesca y se observó que el pulpo y el boquinete fueron las especies más importantes para el uso de la jimba y del buceo respectivamente. Debido a este resultado se decidió realizar un MZPP para cada una de ellas en las cuales se evaluó toda la costa de Yucatán, para la combinación Jimba-Pulpo-Yucatán (JPuY) y para la combinación Buceo-Boquinete-Yucatán (BBoY). Las especies secundarias que se observaron en los métiers deben tener un MZPP que se encuentre delimitado para el área de importancia de cada localidad, sin embargo, debido a los alcances de este estudio no se llevaron a cabo y se recomienda puedan ser desarrollados para un trabajo posterior.

Entre las actividades productivas que se realizan en la actualidad, la pesca es similar a salir de cacería. Donde el pescador asume el riesgo de que la captura que obtenga pueda ser menor a los gastos que representan salir a pescar. Para enfrentar dicho reto, el pescador debe evaluar las condiciones ambientales, la temporada, el riesgo de sufrir accidentes, sus necesidades económicas, sus habilidades, etc. (Boonstra & Hentati, 2016). Generalmente los pescadores identifican las temporadas y los sitios donde se maximizan sus ingresos, por ende, es razonable suponer que los costos y las ganancias dependen de la precisión que tengan los pescadores al elegir un sitio y que conforme una pesquería se va agotando los espacios tienden a disminuir (Saldaña *et al.* 2017). La construcción de los MZPP logró identificar los rangos de las características ambientales que delimitan la idoneidad del sitio de pesca, mostrando en el caso del modelo JPuY, que los espacios de la zona potencial de pesca ideal son pocos y en el caso del modelo BBoY los espacios ideales se encuentran en casi toda la zona de estudio. Esto se puede deber a que la pesquería artesanal de pulpo suele ser realizada en zonas cercanas a la costa, no mayor a 20 km de distancia, mientras que el uso del buceo suele ser realizado tanto en zonas someras como en zonas alrededor de 30 km de distancia.

Entre las decisiones más comunes que un pescador debe tomar, se encuentra la elección de la especie objetivo, lo cual dependerá del tipo de método de pesca que sepa utilizar, las regulaciones pesqueras, así como de las condiciones temporales para realizar su captura. Los MZPP permiten entender cuál es la mejor combinación de variables espacio temporales al utilizar el método de buceo y el de jimba, por ejemplo, se puede observar en el modelo BBoY que la idoneidad del sitio de pesca disminuye considerablemente durante el mes de octubre, lo cual puede ser un incentivo para que el pescador cambie a otro método de pesca o especie objetivo durante ese mes a otro que le ofrezca mayor certidumbre.

La implementación de acciones de conservación o las estrategias que busquen incrementar la recuperación de las poblaciones (zonas de refugio pesquero, áreas marinas protegidas, instalación de refugios artificiales, etc.), se puede identificar a través de los MZPP los sitios donde el esfuerzo de pesca se encuentra más focalizado. Considerando las variables ambientales que vuelven susceptible de captura al organismo y considerarlo al momento de definir las áreas de protección o la instalación de estructuras.

También permiten identificar los espacios y condiciones ambientales que se deben considerar en la implementación de planes de manejo espacial marítimo. Reduciendo los conflictos entre

sectores productivos (petróleo, turismo, transporte) ya que permiten identificar los límites y espacios que son necesarios para el desarrollo de las operaciones pesqueras.

Las MZPP ofrecen información relevante para mejorar las acciones de vigilancia, delimitando los sitios donde la probabilidad de encontrar embarcaciones pesqueras es mayor, incluso durante los meses que se encuentre el recurso en veda. También permite identificar qué condiciones ambientales son las idóneas para realizar la ejecución de un método de pesca y contrastarlo con lo observado durante sus acciones de vigilancia, lo cual puede funcionar como indicador. En el caso del modelo JPuY se observa que los meses de abril, mayo y junio cuentan con mejores condiciones ambientales para pescar en la mayoría de la península, lo cual nos puede indicar los meses en que las acciones de vigilancia deberían incrementar para disminuir la captura de pulpo durante la temporada de veda. También se puede comprender que el arte de pesca Jimba mejora su capacidad de captura cuando la velocidad de las corrientes demersales son más bajas y por ende no buscar pescadores de pulpo cuando hay marea de fondo.

Al seguir el cambio a través de los años, este tipo de modelos permite identificar claramente cómo cambian los escenarios de idoneidad de la pesca, ofreciendo una alternativa espaciotemporal, que explique los cambios en el comportamiento del pescador. Permitiendo implementar medidas de regulación pesquera o acciones de control del esfuerzo, en los sitios y temporadas que se requiere. Así mismo el conocer las características actuales de los MZPP permiten generar simulaciones con los escenarios de cambio climático y predecir cómo se verían afectadas las actividades pesqueras para cada uno de los distintos escenarios.

3.4.1 Operación de las capturas de pulpo realizadas con la jimba en Yucatán

La operación del arte de pesca jimba ocurre mediante el método de gareteo el cual consiste en dejar la embarcación a la deriva, para ser arrastrada por la corriente, de esta manera cuando el pescador despliega el arte de pesca de la jimba, arroja entre 8 y 10 líneas con la carnada (crustáceos), las cuales se sitúan en el fondo para que con el arrastre de la corriente simule el movimiento de la carnada, esto atrae al pulpo y puede ser capturado. Debido a esto la velocidad demersal que se encuentra por debajo de a los $0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ resulta ser la más adecuada para llevar las capturas con jimba, esto se pudo observar en todas las proyecciones mensuales, donde existe una pequeña zona cercana a la costa y los puertos de DB y RL donde

se registra la mayor probabilidad de obtener capturas de pulpo y es debido a que son las zonas donde la velocidad demersal regularmente es menor a 0.10ms^{-1} (Cahuich-López *et al.*, 2020; HYbrid Coordinate Ocean Model, 2020). Adicionalmente a pesar de que es la variable menos importante la velocidad superficial también favorece las bajas velocidades en la superficie por debajo de 0.3 m. s^{-1} y no se registraron capturas en velocidades superiores a 1.21 m. s^{-1} . Las corrientes en la península se ven afectadas por la dirección del viento y la influencia que proviene de la corriente de Yucatán (Enriquez *et al.*, 2010), debido a esto las áreas de menor velocidad demersal disminuyen durante la época de nortes, ya que el ángulo de los vientos cambia (Cahuich-López *et al.*, 2020).

En el trabajo realizado por Gamboa-Álvarez, *et al.*, 2015, donde se evalúa la capturabilidad de *O. maya*, se identifican zonas espacialmente similares, cercanas a la costa las cuales se asocian a pulsos de la productividad primaria provocado por los eventos de surgencia.

La distancia es la segunda variable más importante y se puede observar con mayor detalle en las gráficas mensuales, se aprecia cuando al incrementar la distancia las condiciones mejoran, se observan en anillos muy bien delimitados con el borde de la costa a medida que la distancia avanza. La importancia de la distancia para la pesca realizada con jimba ha sido reportada en otros trabajos (Gamboa-Álvarez *et al.*, 2015; Monroy *et al.*, 2010) y se observa que habitualmente los pescadores operan en zonas cercanas a la costa y someras.

Al observar el proceso de la temperatura a través de la temperatura demersal y la temperatura superficial se puede apreciar que hay temperaturas entre 5° y 15°C , las cuales suceden en la zona del Mar Caribe, en general la temperatura en el Banco de Campeche se mantiene entre 24° y 30°C (HYbrid Coordinate Ocean Model, 2020), presentando temperaturas de 24°C durante la temporada de nortes, incrementando la temperatura de 25° a 28°C , durante la temporada de secas, y manteniéndose entre 29° y 30° durante la temporada de lluvias (HYbrid Coordinate Ocean Model, 2020). La temperatura que genera menor estrés al *O. maya* se encuentra por debajo de los 27°C , ya que en temperaturas mayores a 28°C , se comienza a poner en riesgo el sistema reproductivo de los machos (López-Galindo *et al.*, 2019).

3.4.2 Operación de las capturas de boquinete realizadas con buceo en Yucatán

En las proyecciones mensuales obtenidas del modelo BBoY la variable más importante es la distancia, la cual mejora la probabilidad de captura al alejarse de la costa. La distancia representa una variable que limita las operaciones de pesca, debido a que si aumenta la distancia del viaje incrementa la inversión que debe realizar un pescador debido a los costos de combustible (Salas *et al.*, 2019b), sin embargo la distribución en la plataforma de Yucatán de las especies de escama, incluyendo al boquinete, cambia a lo largo del ciclo de vida, donde organismos de menor talla se ubican en aguas someras cercanas a la costa y conforme la talla incrementa se desplazan a zonas más profundas alejándose de la costa (López-Rocha *et al.*, 2009 ; Coronado & Salas, 2010). En estudios que evalúan cómo ha cambiado en el tiempo la distribución espacial del esfuerzo de pesca, se ha observado un decremento en la disponibilidad de especies en zonas someras, por lo cual el pescador ha incrementado la distancia donde realiza sus actividades (Damasio *et al.*, 2020; Saldaña *et al.*, 2017). Durante el muestreo de este estudio en las operaciones de buceo se observó que, el capitán de la embarcación cuenta con conocimiento previo de puntos de captura, los cuales almacena en un GPS, LORAN o una libreta de navegación, lo cual también es observado en otros estudios (Bastos.GC. & Petrere, 2010; Holland & Sutinen, 1999). El capitán traza una ruta la cual comienza en el punto más lejano del puerto y he inicia el recorrido pasando por diversos sitios con dirección al puerto.

La surgencia que proviene de la zona frente a Cabo Catoche es un proceso dinámico en el cual intervienen una gran cantidad de fenomenos que modifican su comportamiento (Jouanno *et al.*, 2018). Así mismo, su presencia influye sobre la mayoría de los ecosistemas en la zona, aportando nutrientes, marcando patrones en la temperatura del área e incrementando la velocidad de las corrientes (Enriquez *et al.*, 2013; Jouanno *et al.*, 2018; Reyes-Mendoza *et al.*, 2016), estos efectos en los ecosistemas, genera impactos en las actividades socioeconómicas como lo son las pesquerías, debido a que el aporte de nutrientes es de gran importancia para los stock pesqueros de la plataforma de Yucatán (Salas *et al.*, 2006). En evaluaciones sobre el comportamiento de las corrientes oceánicas ante diversos escenarios de cambio climático, se predice que corrientes como las de Cabo Catoche incrementarán su fuerza, lo cual indica que podría generarse una externalidad positiva en la región, al incrementar el aporte de nutrientes, desafortunadamente en estos escenarios también se

predice que los cuerpos de agua con poco o nulo oxígeno incrementarán su cobertura, principalmente en los sitios de poca profundidad, lo cual podría generar el incremento de fenómenos de marea roja en la región (Barange *et al.*, 2018; Meaden *et al.*, 2016). Ante este tipo de escenarios se vuelve necesario realizar proyecciones que nos permitan identificar cómo se verían afectadas las operaciones de pesca ante el cambio climático.

Lo que se observa en este estudio son amplias extensiones espaciales donde la probabilidad de encontrar al boquinete son superiores al 60%, sin embargo dependiendo del mes en algunas zonas disminuye la probabilidad de capturas, lo cual se encuentra relacionado con los procesos en el cambio de las temperaturas del agua y el incremento en la corriente demersal, lo cual coincide con las posibles presencias en la surgencia de Cabo Catoche (Enriquez *et al.*, 2013; Jouanno *et al.*, 2018). Sin embargo, este fenómeno no mejora las oportunidades en la captura de boquinete, lo cual pone en consideración que dicho proceso limita la operación del método de pesca.

Durante el proceso de observación a bordo en las embarcaciones, un elemento que se pudo observar fue que las velocidades elevadas en el fondo dificultan las operaciones realizadas con el pescador, limitando las capturas debido a las complicaciones en la estabilidad del buzo. Esto coincide con lo reportado por Huchim-Lara (2010), donde se observa que el pescador para tratar de mantenerse lo más estable posible mientras busca a las presas, cuando la corriente es muy elevada busca sujetarse de rocas con el “bichero”, un gancho que le sirve también para capturar langosta. También se observó algunas de las razones por las que el pescador cambia de sitio de pesca, la turbidez del agua, la presencia de mareas rojas y trata de evitar zonas someras cercanas a la costa. Lo cual concuerda con este estudio al observar que el incremento en la velocidad demersal, disminuye la probabilidad de captura de boquinete y que a mayor distancia mejoran las capturas.

Conclusiones

Ante la complejidad que representa el manejo de las pesquerías artesanales, el identificar el cómo, cuándo y dónde se focaliza el esfuerzo de pesca, ofrece información clave para su manejo. Lo cual permite comprender a mayor detalle: i) qué elementos afectan las tasas de captura de una o varias especies objetivo; ii) cuáles son los incentivos que experimenta un pescador para que opte por capturar una especie, o usar un arte de pesca determinado; iii) delimitar las áreas más indicadas para establecer zonas de protección; iv) identificar cuáles son las zonas potenciales para la pesca en el diseño e implementación de planes de manejo espacial marítimo; v) mayor precisión en la implementación de acciones de vigilancia; vi) seguimiento del cambio en la distribución del esfuerzo de pesca en el tiempo; vii) generar predicciones sobre las afectaciones de la actividad pesquera ante los distintos escenarios de cambio climático.

La estrategia de realizar un análisis espacial sobre pesquerías mixtas abordado desde el enfoque de métiers, permite obtener información considerando la complejidad inmersa de las operaciones pesqueras, más allá del tamaño de las embarcaciones, generando modelos espacio-temporales sobre actividades específicas de la pesca.

El uso de herramientas multivariadas permitió identificar como se diferencian las distintas localidades, donde se usan la jimba y el buceo, a través de la estructura de las especies capturadas, estableciendo un robusto criterio ecológico en la caracterización de los métiers.

La sustentabilidad en las pesquerías es un objetivo difícil de alcanzar frente a los retos que se observan de las proyecciones de cambio climático, por ello es de suma importancia generar conocimiento holístico que permita dilucidar la complejidad del sistema pesquero. Esto representa una oportunidad para encontrar los incentivos necesarios para trabajar tanto con el gobierno como con las comunidades pesqueras para resolver los desafíos que establece lograr la sustentabilidad. Los análisis donde se relaciona lo ecológico y lo social desde un enfoque espacio-temporal, permiten comprender los diferentes escenarios donde se realiza la actividad pesquera y los diversos procesos que acontecen durante la implementación de una estrategia de manejo pesquero. Con lo cual se brinda información relevante para ser contemplada en las estrategias de manejo sobre las pesquerías.

La identificación de métiers para delimitar el acontecer de una práctica pesquera, resultó adecuado para comprender sobre la relación dinámica entre los artes de pesca y las especies que capturan. Tradicionalmente la categorización de la actividad pesquera se ha realizado a través del tamaño de la flota y a una escala espacial estatal, ignorando cómo sucede la asignación espacial del esfuerzo de pesca al interior de cada flota y entre las localidades, sobre todo siendo estas multi-artes y multi-específicas. Durante este trabajo se observó que el mismo arte de pesca incide sobre distintos objetivos en las diferentes localidades, con lo que estos resultados pueden ser considerados para el diseño de regulaciones espaciales de la flota artesanal en Yucatán, reconociendo las diferencias que existen en la operación de pesca a través de los artes o métodos de pesca que se ocupan por la flota.

Es necesario realizar más estudios que evalúen la operación de la jimba en combinación con el cordel de mano, debido a que el impacto sobre el ensamblaje de especies puede ser más importante que lo que se percibe en este estudio. Por lo cual sería recomendable realizar evaluaciones con MZPP que permitan comprender como operan estas pesquerías. En el caso del método de buceo el ensamblaje de especies capturados para esta especie requiere que se analicen otros MZPP y permitan comprender la complejidad de las relaciones entre el método y las especies de importancia.

Evaluar el comportamiento del pescador a través del análisis de MZPP, ofrece una oportunidad de comprender las interacciones que suceden en las pesquerías de pequeña escala, identificando los procesos ambientales que intervienen durante la asignación del esfuerzo de pesca. Delimitando zonas donde las características ambientales limitan o favorecen la ejecución de un arte de pesca y cómo cambian a través del tiempo.

En el caso de la pesquería con jimba para la captura de pulpo, las zonas cercanas a la costa, con corrientes demersales de baja velocidad, ofrecen el mejor escenario para la ejecución del método de pesca, por lo cual es recomendable considerar que, durante la implementación de regulaciones, se contemple la importancia que radica en estos sitios para llevar a cabo la actividad, favoreciendo su aprovechamiento durante la temporada de pesca o reforzando la vigilancia durante el período de veda.

En el caso de la pesca con buceo, las capturas de boquinete muestran una extensa área donde las probabilidades de captura son favorables, lo cual dificulta la definición de un área en específico. Sin embargo, la comprensión sobre las limitaciones observadas durante la

Distribución espaciotemporal potencial de especies capturadas por la flota artesanal

ejecución del método de buceo impuestas por la velocidad de la corriente demersal permiten identificar escenarios de riesgo para llevar a cabo la actividad, lo cual brinda información que puede servir para establecer alertas que desincentiven al pescador de operar, con el objetivo de disminuir el riesgo.

Referencias bibliográficas

- Andersen, B. S., Ulrich, C., Eigaard, O. R., & Christensen, A. (2012). Short-term choice behaviour in a mixed fishery: investigating métier selection in the Danish gillnet fishery. *ICES Journal of Marine Science*, 69, 131–143. <https://doi.org/doi:10.1093/icesjms/fsr181> Short-term
- Anderson, M. J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*, 26(2001), 32–46.
- Anderson, M. J., Walsh, D. C. I., Robert Clarke, K., Gorley, R. N., & Guerra-Castro, E. (2017). Some solutions to the multivariate Behrens–Fisher problem for dissimilarity-based analyses. *Australian and New Zealand Journal of Statistics*, 59(1), 57–79. <https://doi.org/10.1111/anzs.12176>
- Appendini, C. M., Meza-Padilla, R., Abud-Russell, S., Proust, S., Barrios, R. E., & Secaira-Fajardo, F. (2019). Effect of climate change over landfalling hurricanes at the Yucatan Peninsula. *Climatic Change*, 157(3–4), 469–482. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02569-5>
- Araújo, M. B., & New, M. (2007). Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology and Evolution*, 22(1), 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.09.010>
- Araújo, M. B., & Peterson, T. A. (2012). Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling MIGUEL. *Ecological Society of America*, 93(7), 1527–1539. Retrieved from maraujo@mncn.csic.es
- Arreguín-Sánchez, F., & Arcos-Huitrón, E. (2011). La pesca en México: estado de la explotación y uso de los ecosistemas. *Hidrobiológica*, 21(3), 431–462.
- Balsam, W. L., & Beeson, J. P. (2003). Sea-floor sediment distribution in the Gulf of Mexico. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 50(12), 1421–1444. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2003.06.001>
- Barange, M., Bahri, T., Beveridge, M. C. M., Cochrane, K. L., Funge-Smith, S., & Poulain, F. (2018). *Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options*. (M. Barange, T. Bahri, M. C. M. Beveridge, K. L. Cochrane, S. Funge-Smith, & F. Poulain, Eds.) (FAO). Rome: FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 627.
- Barbet-Massin, M., Jiguet, F., Albert, C. H., & Thuiller, W. (2012). Selecting pseudo-absences for species distribution models : how , where and how many ? *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 327–338. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00172.x>
- Barhri, T., Vasconcellos, M., Welch, D, Johnson, J., Perry, R.I., Xuechan, M. (eds). (2021). *Adaptive fisheries management in response to climate change*. (M. Barhri, T., Vasconcellos, M., Welch, D, Johnson, J., Perry, R.I., Xuechan, Ed.), *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 667* (Food and A). Rome: FAO Fisheries and Aquaculture. Retrieved from <https://doi.org/10.4060/cb3095en%0A>
- Basset, A., Elliott, M., West, R. J., & Wilson, J. G. (2013). Estuarine and lagoon biodiversity and their natural goods and services. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 132, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.05.018>
- Bastos.GC., & Petrere, M. (2010). Small-scale marine fisheries in the municipal district of Florianópolis , Santa Catarina , Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 70(November 2010),

947–953. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842010000500005>

- Boonstra, W. J., & Hentati-Sundberg, J. (2016). Classifying fishers' behaviour. An invitation to fishing styles. *Infancy*, 17(5), 78–100. <https://doi.org/10.1111/faf.12092>
- Branch, T. A., Hilborn, R., Haynie, A. C., Fay, G., Flynn, L., Griffiths, J., ... Young, M. (2006). Fleet dynamics and fishermen behavior: lessons for fisheries managers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 63(7), 1647–1668. <https://doi.org/10.1139/f06-072>
- Brodie, S., Jacox, M. G., Bograd, S. J., Welch, H., Dewar, H., Scales, K. L., ... Hazen, E. L. (2018). Integrating dynamic subsurface habitat metrics into species distribution models. *Frontiers in Marine Science*, 5(JUN), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00219>
- Cahuich-López, M. A., Mariño-Tapia, I., Souza, A. J., Gold-Bouchot, G., Cohen, M., & Lozano, D. V. (2020). Spatial and temporal variability of sea breezes and synoptic influences over the surface wind field of the Yucatán Peninsula. *Atmosfera*, 33(2), 123–142. <https://doi.org/10.20937/ATM.52713>
- Clarke, K R. (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 18(1988), 117–143.
- Clarke, K Robert, Somerfield, P. J., & Chapman, M. G. (2006). On resemblance measures for ecological studies , including taxonomic dissimilarities and a zero-adjusted Bray – Curtis coefficient for denuded assemblages. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 330, 55–80. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2005.12.017>
- CONAPESCA. (2018). *Anuario estadístico de Acuacultura y Pesca 2018. COMISIÓN NACIONAL DE ACUACULTURA Y PESCA* (Vol. 53). Mazatlán, Sinaloa México. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Coronado Castro, E., Salas, S., & Brulé, T. (2013). Estimación de la Composición de las Capturas y la Cuasi - Renta de Diferentes Flotas Dirigidas a la Pesquería de Mero Rojo en Yucatán , México. *Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, 65, 375–383.
- Coronado, E. V., & Salas, S. (2010). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS OPERACIONES DE PESCA DE TRES FLOTAS QUE INCIDEN SOBRE EL RECURSO MERO ROJO Y ESPECIES ASOCIADAS EN YUCATÁN*. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.
- Damasio, L. M. A., Peninno, M. G., & Lopes, P. F. M. (2020). Small changes, big impacts: Geographic expansion in small-scale fisheries. *Fisheries Research*, 226(February), 9. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105533>
- David W. Roberts (2019). labdsv: Ordination and Multivariate Analysis for Ecology. R package version 2.0-1. <https://CRAN.R-project.org/package=labdsv>
- Daw, T. M. (2008). Spatial Distribution of Effort by Artisanal Fishers : Exploring Economic Factors Affecting the Lobster Fisheries of the Corn Islands , Nicaragua. *Fisheries Research*, 90, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2007.09.027>
- Defeo, O. (2015). *Enfoque ecosistémico pesquero. Conceptos fundamentales y su aplicación en pesquería de pequeña escala en América Latina*. Roma, Italia: FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper.
- Elith, J., & Leathwick, J. R. (2009). Species Distribution Models : Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. *The Annual Review of Ecology, Evolution, and*

Systematics, 40, 677–697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>

- Enriquez, C., Mariño-Tapia, I. J., & Herrera-Silveira, J. A. (2010). Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events. *Continental Shelf Research*, 30(2), 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.10.005>
- Enriquez, C., Mariño-Tapia, I., Jeronimo, G., & Capurro-Filigrasso, L. (2013). Thermohaline processes in a tropical coastal zone. *Continental Shelf Research*, 69, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.08.018>
- FAO. (2020). *El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura. La Sostenibilidad en Acción. Marine Pollution Bulletin* (FAO, Vol. 3). Roma: FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/ca9229es>.
- Fulton, E. A., Smith, A. D. M., Smith, D. C., & van Putten, I. E. (2011). Human behaviour: the key source of uncertainty in fisheries management. *Fish and Fisheries*, 12(1), 2–17. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2010.00371.x>
- Gamboa-Álvarez, M. Á., López-Rocha, J. A., & Poot-López, G. R. (2015). Spatial analysis of the abundance and catchability of the red octopus octopus maya (Voss and Solís-Ramírez, 1966) on the continental shelf of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Journal of Shellfish Research*, 34(2), 481–492. <https://doi.org/10.2983/035.034.0232>
- Gómez Ramírez, M. (2018). Ciclones Tropicales que Entraron a la Península de Yucatán de 1970 a 1995 Author (s): Mario Gómez Ramírez Published by : Pan American Institute of Geography and History Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/40992751> Ciclones Tropicales que Entraron a. *Revista Geográfica*, 124(124), 153–171
- Guisan, A., Thuiller, W., & Zimmermann, N. E. (2019). *Habitat Suitability and Distribution Models*. (M. Usher, D. Saunders, R. Peet, & A. Dobson, Eds.), *ECOLOGY, BIODIVERSITY AND CONSERVATION* (Cambridge, Vol. 53). United Kingdom: Cambridge University Press. Retrieved from <https://www.cambridge.org/core>
- Hernandez, A., & Kempton, W. (2003). Changes in fisheries management in Mexico : Effects of increasing scientific input and public participation. *Ocean and Coastal Management*, 46, 507–526. [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(03\)00032-2](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(03)00032-2)
- Herrera-Silveira, J. A. (1994). Spatial Heterogeneity and Seasonal Patterns in a Tropical Coastal Lagoon. *Journal of Coastal Research*, 10(3), 738–746. Retrieved from <http://www.jstor.com/stable/4298266>
- Herrera-Silveira, J. A., Comin, F. A., Aranda-Cirerol, N., Troccoli, L., & Capurro, L. (2004). Coastal water quality assessment in the Yucatan Peninsula: Management implications. *Ocean and Coastal Management*, 47(11-12 SPEC. ISS), 625–639. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2004.12.005>
- Herrera-Silveira, J., Cynthia, Á.-G., Merino Virgilio, F., & AguilarTrujillo, A. (2010). Mareas rojas en las costas de Yucatán. In R. Garcia Durán & M. Méndez González (Eds.), *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán* (pp. 320–321). Mérida, Yucatán: CICY.
- Hilborn, R., & Walters, C. J. (1992). *Quantitative stock assessment: choice, dynamics and uncertainty*. Springer-Science+Bussines Media, B.V. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3598-0>
- Holland, D. S., & Sutinen, J. G. (1999). An empirical model of fleet dynamics in New England trawl fisheries. *Journal Fish. Aquat. Sci.*, 56, 253–264. <https://doi.org/10.1139/f98-169>

- Huchim-Lara, R. O. (2010). *ENFERMEDAD POR DESCOMPRESION EN PESCADORES DE LANGOSTA DE LA COSTA ORIENTE DE YUCATAN*. Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del Instituto Politecnico Nacional.
- HYbrid Coordinate Ocean Model. (2020). HYCOM. Retrieved November 19, 2020, from <https://www.hycom.org/hycom/overview>
- Iriondo, A., Prellezo, R., Santurtún, M., Gracia, D., Quincoces, I., & Mugreza, E. (2010). A multivariate approach for metier definition: A case study of Basque Country trawlers. *Revista de Investigación Marina*, 17(6), 139–148. Retrieved from www.azti.es
- Jari Oksanen, F. Guillaume Blanchet, Michael Friendly, Roeland Kindt, Pierre Legendre, Dan McGlinn, Peter R. Minchin, R. B. O'Hara, Gavin L. Simpson, Peter Solymos, M. Henry H. Stevens, Eduard Szoecs and Helene Wagner (2019). *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.5-6. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Jouanno, J., Pallás-Sanz, E., & Sheinbaum, J. (2018). Variability and Dynamics of the Yucatan Upwelling: High-Resolution Simulations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, 1251–1262. <https://doi.org/10.1002/2017JC013535>
- Kjerfve, B. (1994). Coastal lagoons. *Coastal Lagoon Processes*, 60(1952), 1–8. <https://doi.org/10.2307/634562>
- Legendre, P., & Legendre, L. (1998). *Numerical Ecology* (Second). Amsterdam: Elsevier B.V.
- Licea, S., Luna, R., Okolodkov, Y. B., & Cortés-Altamirano, R. (2017). Phytoplankton abundance and distribution on the Yucatan shelf (June 1979 and April 1983). *Novosti Sistematiki Nizshikh Rastenii*, 51(1), 121–144. <https://doi.org/10.31111/nsnr/2017.51.121>
- Lobo, J. M., Jimenéz-Valverde, A., & Hortal, J. (2010). The uncertain nature of absences and their importance in species distribution modelling. *Ecography*, 33(1), 103–114. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.x>
- López-Galindo, L., Galindo-Sánchez, C., Olivares, A., Avila-Poveda, O. H., Díaz, F., Juárez, O. E., ... Rosas, C. (2019). Reproductive performance of Octopus maya males conditioned by thermal stress. *Ecological Indicators*, 96, 437–447. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.036>
- López-Rocha, J. A., Albaladejo-Lucero, M. O., Arreguín-Sánchez, F., & de Anda-Montañez, J. A. (2009a). Analysis of the spatial and seasonal variation in catchability of red grouper, *Epinephelus morio* (Valenciennes, 1828), in the Campeche Bank before overfishing (1973-1977). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 44(3), 751–761. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572009000300020>
- López-Rocha, J. A., Albaladejo-Lucero, M. O., Arreguín-Sánchez, F., & de Anda-Montañez, J. A. (2009b). Analysis of the spatial and seasonal variation in catchability of red grouper, *Epinephelus morio* (Valenciennes, 1828), in the Campeche Bank before overfishing (1973-1977). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 44(3), 751–761. <https://doi.org/10.4067/s0718-19572009000300020>
- Luna-Niño, B. R. (2016). *Interacción de los frentes fríos con la Sierra Madre Oriental*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Markaida, U., Méndez-Loeza, I., & Rosales-Raya, M. L. (2017). Seasonal and spatial trends of Mayan octopus, *Octopus maya*, population dynamics from Campeche, Mexico. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 97(8), 1663–1673.

<https://doi.org/10.1017/S0025315416001132>

- McBride, R. S., Thurman, P. E., & Bullock, L. H. (2008). Regional variations of hogfish (*Lachnolaimus maximus*) life history: Consequences for spawning biomass and egg production models. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, *41*, 1–12. <https://doi.org/10.2960/J.v41.m609>
- Meaden, G. J., Aguilar-Manjarrez, J., Corner, R. A., O'Hagan, A. M., & Cardia, F. (2016). *Marine spatial planning for enhanced fisheries and aquaculture sustainability: its application in the Near East*. (G. J. Meaden, J. Aguilar-Manjarrez, R. A. Corner, A. M. O'Hagan, & F. Cardia, Eds.), *Fisheries and Aquaculture Technical Paper 604* (FAO Fisher). Rome: FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 604. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i6043e.pdf>
- Monroy, C., Salas, S., & Bello-Pineda, J. (2010). Dynamics of Fishing Gear and Spatial Allocation of Fishing Effort in a Multispecies Fleet. *North American Journal of Fisheries Management*, *30*(5), 1187–1202. <https://doi.org/10.1577/m09-101.1>
- Naimi, B., & Araújo, M. B. (2016). Sdm: A reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. *Ecography*, *39*(4), 368–375. <https://doi.org/10.1111/ecog.01881>
- Paz-ríos, C. E., Pech, D., Mariño, I., & Simoes, N. (2020). Influence of bottom environment conditions and hydrographic variability on spatiotemporal trends of macrofaunal amphipods on the Yucatan continental shelf. *Continental Shelf Research*, *198*(July 2019), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104098>
- Pelletier, D., & Ferraris, J. (2000). A multivariate approach for defining fishing tactics from commercial catch and effort data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *57*, 51–65.
- Pennino, M., Muñoz, F., Conesa, D., López-Quílez, A., & Bellido, J. M. (2014). Bayesian spatio-temporal discard model in a demersal trawl fishery. *Journal of Sea Research*, *90*, 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2014.03.001>
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G. ., Anderson, R. P. ., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Bastos Araújo, M. (2011). *Ecological Niches and Geographic Distributions*. Oxfordshire; New Jersey: PRINCETON UNIVERSITY PRESS.
- Pikitch, E. K., Santora, C., Babcock, E. A., Bakun, A., Bonfil, R., Conover, D. O., ... Link, J. (2004). Ecosystem-Based Fishery Management. *Science*, *305*, 346–347. <https://doi.org/10.1126/science.1098222>
- Poot-salazar, A., Hernandez Flores, A., & Ardisson, P.-L. (2015). Indicadores de sostenibilidad para la evaluación de las pesquerías de pepino de mar en la península de Yucatán , México. *Ciencia Pesquera*, *23*(2), 11–24.
- Ramírez-Rodríguez, M., & Ojeda-Ruíz, M. Á. (2012). Spatial management of small-scale fisheries on the west coast of Baja California Sur, Mexico. *Marine Policy*, *36*(1), 108–112. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2011.04.003>
- Reyes-Mendoza, O., Herrera-silveira, J., Mariño-tapia, I., & Enriquez, C. (2019). Phytoplankton blooms associated with upwelling at Cabo Catoche. *Continental Shelf Research*, *174*(June 2018), 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.12.015>
- Reyes-Mendoza, O., Mariño-Tapia, I., Herrera-Silveira, J., Ruiz-Martínez, G., Enriquez, C., & Largier, J. L. (2016). The Effects of Wind on Upwelling off Cabo Catoche The Effects of Wind on Upwelling off Cabo Catoche. *Journal of Coastal Research*, *32* (3)(July), 638–650.

<https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00043.1>

- Rios-Lara, V., Salas, S., Javier, B. P., & Ayora, P. I. (2007). Distribution patterns of spiny lobster (*Panulirus argus*) at Alacranes reef, Yucatan: Spatial analysis and inference of preferential habitat. *Fisheries Research*, *87*(1), 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2007.06.021>
- SAGARPA. (2015, May 12). Plan de manejo pesquero de pepino de mar café (*Isostichopus badiotus*) y lápiz (*Holothuria floridana*) en la península de Yucatán. *Diario Oficial de La Federación*, pp. 10–17.
- Salas, Silvia, Barragán-Paladines, M. J., & Chuenpagdee, R. (2019a). *Cooperation, Competition, and Attitude Toward Risk of Small-Scale Fishers as Adaptive Strategies: The Case of Yucatán, Mexico*. (Silvia Salas, M. J. Barragán-Paladines, & R. Chuenpagdee, Eds.) (Center of). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76078-0_5
- Salas, Silvia, & Gaertner, D. (2004). The behavioural dynamics of fishers: Management implications. *Fish and Fisheries*, *5*(2), 153–167. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2004.00146.x>
- Salas, Silvia, Mexicano-Cítnora, G., & Cabrera, M. A. (2006). *¿Hacia donde van las pesquerías en Yucatán?* (1st ed.). Mérida, Yucatán: Cinvestav.
- Salas, Silvia, Torres-Irinea, E., & Coronado, E. (2019b). Towards a métier-based assessment and management approach for mixed fisheries in Southeastern Mexico. *Marine Policy*, *103*(March), 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.02.040>
- Saldaña, A., Salas, S., Arce- Ibarra, A. M., & Torres - Irinea, E. (2016). Fishing operations and adaptive strategies of small-scale fishers : insights for fisheries management in data-poor situations. *Fisheries Management and Ecology*, 1–14. <https://doi.org/10.1111/fme.12199>
- Shester, G. G., & Micheli, F. (2011). Conservation challenges for small-scale fisheries : Bycatch and habitat impacts of traps and gillnets. *Biological Conservation*, *144*(5), 1673–1681. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.02.023>
- Silveira, J. H., & Morales-ojeda, S. M. (2018). Subtropical Karstic Coastal Lagoon Assessment, SE Mexico. In M. J. Kennish & H. W. Paerl (Eds.), *Costal Lagoons: Critical Habitats of Environmental Change* (1st ed., pp. 309–331). Boca Raton, Florida, US: Taylor & Francis Group.
- Thuiller, W., Lafourcade, B., Engler, R., & Araújo, M. B. (2009). BIOMOD - a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, *32*, 369–373. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2008.05742.x>
- Torres-Irinea, E., Gaertner, D., Delgado De Molina, A., & Ariz, J. (2011). Effects of time-area closure on tropical tuna purse-seine fleet dynamics through some fishery indicators. *Aquatic*, *350*, 337–350. <https://doi.org/10.1051/alr/2011143>
- Torres-Irinea, E., & Salas, S. (2008). Análisis Comparativo de Patrones de Captura de Langosta Dados Diferentes Métodos de Pesca en la Península de Yucatán. *Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, *61*, 461–470.
- Torres-Irinea, E., Salas, S., Euán-Avila, J. I., & Joo-Arakawa, R. (2014). Assessing the spatial distribution of small-scale vessels ' operations from VMS data in the southeastern Mexico. In *Proceedings of the 2nd World Small-Scale Fisheries Congress* (pp. 115–121). Mexico.
- Torres-Irinea, E., Salas, S., Euán-Ávila, J. I., Palomo, L. E., Quijano Quiñones, D. R., Coronado,

- E., & Joo, R. (2021). Spatio-Temporal Determination of Small-Scale Vessels ' Fishing Grounds Using a Vessel Monitoring System in the Southeastern Gulf of. *Frontiers in Marine Science*, 8(May), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.643318>
- Ulrich, C., & Andersen, S. Dynamics of fisheries, and the flexibility of vessel activity in Denmark between 1989 and 2001, 61 ICES Journal of Marine Science § (2004). <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2004.02.006>
- Ulrich, C., Wilson, D. C. K., Nielsen, J. R., Bastardie, F., Reeves, S. A., Andersen, B. S., & Eigaard, O. R. (2012). Challenges and opportunities for fleet- and métier-based approaches for fisheries management under the European Common Fishery Policy. *Ocean and Coastal Management*, 70, 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.06.002>
- Valle-Levinson, A., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., & Waterhouse, A. F. (2011). Tidal variability of salinity and velocity fields related to intense point-source submarine groundwater discharges into the coastal ocean. *Limnología y Oceanografía*, 56(4), 1213–1224. <https://doi.org/10.4319/lo.2011.56.4.1213>
- Van Putten, I. E., Kulmala, S., Thébaud, O., Dowling, N., Hamon, K. G., Hutton, T., & Pascoe, S. (2012). Theories and behavioural drivers underlying fleet dynamics models. *Fish and Fisheries*, 13(2), 216–235. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2011.00430.x>
- Velázquez—Abunader, I., Salas, S., & Cabrera, M. A. (2013). Differential Catchability by Zone, Fleet, and Size: The Case of the Red Octopus (*Octopus maya*) and Common Octopus (*Octopus vulgaris*) Fishery in Yucatan, Mexico. *Journal of Shellfish Research*, 32(3), 845–854. <https://doi.org/10.2983/035.032.0328>
- Vera, I., Mario-Tapia, I., & Enriquez, C. (2012). Effects of drought and subtidal sea-level variability on salt intrusion in a coastal karst aquifer. *Marine and Freshwater Research*, 63(6), 485–493. <https://doi.org/10.1071/MF11270>
- Wilfried Thuiller, Damien Georges, Robin Engler and Frank Breiner (2020). biomod2: Ensemble Platform for Species Distribution Modeling. R package version 3.4.12.