



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Acta de Correcciones al Proyecto de Grado Biología

Fecha: 25 de enero de 2024

Autores: José David Cuéllar León

Nombre del Proyecto de Grado: A la Deriva en un Mar Cambiante: Explorando las Implicaciones del Cambio Climático en el área de cría de la Ballena Jorobada (*Megaptera novaeangliae*) en el Pacífico Colombiano y Panameño.

Director: Daniel Osorio Domínguez

Como indica el artículo 2.27 de las Directrices de Trabajo de Grado, he verificado que los estudiantes indicados arriba han implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Calificación correspondiente.

Firma del Director del Proyecto de Grado

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado
en cumplimiento de los requisitos exigidos por la
Pontificia Universidad Javeriana para optar el
título de Biólogo.

Dr. HERNAN CAMILO ROCHA NIÑO
Decano Facultad de Ingeniería

DR. MATEO LOPEZ VICTORIA
Director Carrera Biología

Daniel Osorio Domínguez
Director Trabajo de Grado

Mateo Lopez Victoria
Jurado 1

Laura Benítez
Jurado 2

Santiago de Cali, 18 de noviembre de 2023

Doctor Mateo López Victoria
Director del Programa de Biología
Pontificia Universidad Javeriana Cali

Asunto: Entrega de trabajo de grado del estudiante José David Cuellar León

Mediante la presente carta quiero manifestar que el trabajo de grado titulado “A la Deriva en un Mar Cambiante: Explorando las Implicaciones del Cambio Climático en el área de cría de la Ballena Jorobada (*Megaptera novaeangliae*) en el Pacífico Colombiano y Panameño” Presentado por el estudiante José David Cuellar León se encuentra finalizado y listo para su proceso de evaluación y sustentación durante el coloquio que se llevará a cabo el día 28 de noviembre.

Como jurados de este trabajo sugerimos a los siguientes profesionales:

Mateo López, profesor del departamento de biología

Laura Benítez, bióloga de la fundación Yubarta, laudabe77@gmail.com

Atentamente



Daniel Osorio Domínguez

Director

A la Deriva en un Mar Cambiante: Explorando las Implicaciones del Cambio Climático en el área de cría de la Ballena Jorobada (*Megaptera novaeangliae*) en el Pacífico Colombiano y Panameño

Drifting in a changing sea: Exploring the effects of climate change in the breeding area of the humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) in the Colombian and Panamanian Pacific.

José-David Cuéllar-León¹

¹ Departamento de Ciencias Naturales y Matemáticas Pontificia Universidad Javeriana Cali, Colombia.

Resumen: El cambio climático global ha llevado a impactar ecosistemas marinos, afectando variables clave para la distribución de la ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*). Estas alteraciones, derivadas principalmente de actividades antropogénicas, plantean desafíos significativos para la conservación y el estudio de la distribución de esta especie. Para este estudio se tomaron datos de las costas del Pacífico Noroccidental de Colombia y Panamá que coinciden con la Zona Económica Exclusiva y Áreas Protegidas de estos países, siendo cruciales para la reproducción de las ballenas jorobadas. Estas ballenas desempeñan un papel esencial en su ciclo reproductivo, incluyendo procesos fundamentales como el parto y la lactancia, por lo que es crucial comprender los hábitats donde se distribuyen. Fue utilizando el algoritmo de máxima entropía (MaxEnt), implementando variables de temperatura, salinidad, velocidad de corriente, batimetría y distancia de la costa. Se modeló la variación espacial y temporal del hábitat en los diferentes escenarios RCP26 y RCP85 del CMIP5 con los horizontes de tiempo 2050 y 2100 dando un AUC= 0,80 lo que indicó un rendimiento aceptable del modelo. Los resultados mostraron que la salinidad y la batimetría emergen como factores de mayor importancia en la construcción de un modelo de idoneidad de hábitat, en la distribución de *Megaptera novaeangliae* se experimentó más ganancia en áreas en comparación con las pérdidas. El efecto potencial del cambio climático difiere para la especie evaluada en los tamaños de las áreas potenciales de distribución. Los distintos escenarios del modelo revelan cambios importantes en la idoneidad de hábitat especialmente en la costa pacífica de Panamá donde la idoneidad actual es menor a la del modelo. Según las proyecciones del modelo utilizado en el estudio, las áreas protegidas actuales muestran una insuficiencia en términos de tamaño para garantizar la conservación efectiva de la especie. Se recomienda que las acciones de conservación cuenten con una relevancia crucial en anticipar y comprender las respuestas específicas de la especie ante futuras proyecciones de cambio climático, además de aumentar las acciones de monitoreo para obtener predicciones de mayor calidad.

Palabras clave: Idoneidad de hábitat, Zona Económica Exclusiva, Distribución, Modelación.

Abstract: Global climate change has impacted marine ecosystems, affecting key variables for the distribution of the humpback whale (*Megaptera novaeangliae*). These alterations, mainly produced from anthropogenic activities, represent significant challenges for the conservation and study of the distribution of this species.

In this study was considered data from the northwestern pacific coasts of Colombia and Panama, which coincide with the Exclusive Economic Zone and Protected Areas of these countries. Those areas are crucial for the reproduction cycle of the humpback whales, like calving and lactation. To understand the

changes in the distribution of the humpback whale under climate change scenarios is essential. Here, the maximum entropy algorithm (MaxEnt) was used, implementing variables such as temperature, salinity, current velocity, bathymetry and distance from the coast. The spatial and temporal variation of the habitat was modeled in the different scenarios RCP26 and RCP85 of CMIP5 with the time horizons 2050 and 2100 giving an AUC= 0.80 which indicated an acceptable performance of the model. The results showed that salinity and bathymetry emerge as factors of major importance in the construction of a habitat suitability model, in the distribution of *Megaptera novaeangliae* experienced more area gain compared to loss. The potential effect of climate change differs for the species evaluated in the sizes of the potential areas of distribution. The different scenarios of the model reveal important changes in habitat suitability, especially on the Pacific coast of Panama, where the current suitability is lower than that of the model. According to the model projections used in the study, the current protected areas are insufficient in terms of size to guarantee the effective conservation of the species. It is recommended that conservation actions have a crucial relevance in anticipating and understanding the specific responses of the species to future climate change projections, in addition to increasing monitoring actions to obtain higher quality predictions.

Keywords: Habitat suitability, Exclusive Economic Zone, Distribution, Modeling.

Introducción

El cambio climático global es un fenómeno que está teniendo un profundo impacto en los ecosistemas marinos de todo el mundo, dando lugar a modificaciones significativas en una serie de variables climáticas cruciales para la salud y la estabilidad de los océanos. Estas variables incluyen la temperatura del agua, la salinidad, la acidificación del océano y los patrones de circulación oceánica (Henríquez., 2016). A medida que la Tierra experimenta un aumento en las temperaturas promedio, los océanos absorben una cantidad cada vez mayor de calor, lo que tiene repercusiones en la vida marina y los ecosistemas costeros. Además, los cambios en la salinidad y la acidificación del agua pueden afectar la biodiversidad marina y las tramas tróficas, lo que plantea desafíos significativos para la conservación y la sostenibilidad de los recursos marinos (Sherman & Hempel, 2009). Las actividades antropogénicas han desencadenado cambios en el clima de la Tierra a un ritmo preocupante, lo que plantea la amenaza de efectos potencialmente irreversibles (Cheng et al., 2019; IPCC, 2019; Steffen, 2018). En consecuencia, el cambio climático global ha generado alteraciones significativas en la distribución y abundancia de las especies marinas, asociando las variaciones en la temperatura del agua llevando a cabo modificaciones en las corrientes oceánicas, influyendo directamente en las rutas migratorias de esta especie (Albouy et al., 2020; Bryndum et al., 2019).

La alteración de las condiciones y procesos oceanográficos como consecuencia del cambio climático global, derivado principalmente de las actividades antropogénicas, se proyecta como un fenómeno con repercusiones significativas en los ecosistemas marinos a nivel mundial (Burrows et al., 2011; IPCC, 2014). Uno de los aspectos más impactantes de este fenómeno es su potencial para alterar la distribución de mamíferos marinos en un futuro cercano, donde estas especies, esenciales para la biodiversidad marina y la estabilidad de los ecosistemas acuáticos, se ven directamente afectadas por cambios en la temperatura

del agua, la salinidad y otros procesos oceanográficos desencadenados por el cambio climático global. (Learmonth et al., 2006; Laidre et al., 2015).

La elevación de las temperaturas promedio del planeta impulsa la absorción de un creciente excedente de calor por parte de los océanos, generando modificaciones substanciales en los patrones de circulación oceánica (Schumann et al., 2013). Esta alteración no solo tiene complicaciones para la vida marina en términos generales, sino que también incide en las rutas migratorias de los mamíferos marinos, quienes ajustan su distribución en busca de condiciones más idóneas para suplir sus necesidades biológicas (Laidre et al., 2015).

Estas amenazas y perturbaciones operan tanto a escala regional como global (Read et al., 2004). Comprender cómo estos factores interactúan y afectan a la vida marina es fundamental para el diseño de estrategias de conservación efectivas que puedan mitigar las consecuencias negativas para los mamíferos marinos y, en última instancia, para el equilibrio de los ecosistemas marinos en todo el mundo (Carr., 2017). Considerando la distribución de los mamíferos marinos y los múltiples factores que influyen en esta distribución, es factible anticipar y comprender las dinámicas de cambios en su rango geográfico, específicamente en respuesta a las diversas alteraciones generadas en el paisaje marino debido a la actividad humana (Krüger et al., 2018; Kopp et al., 2023).

La ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*), representa una especie de significativa importancia ecológica en los ecosistemas marinos. A lo largo del tiempo, esta especie ha enfrentado diversas amenazas, incluyendo la caza indiscriminada, la contaminación acústica y la pérdida de hábitat (Ávila & Giraldo., 2022). La conservación de *M. novaeangliae* se ha convertido en una prioridad, centrando los esfuerzos en la implementación de medidas para reducir las colisiones con embarcaciones, minimizar la contaminación marina y preservar los hábitats críticos para su alimentación y reproducción (Herrera., 2007).

M. novaeangliae se caracteriza por sus hábitos migratorios, donde tienen sitios de alimentación y sitios de reproducción. En este sentido, las costas del pacífico Noroccidental frente a Colombia y Panamá revisten una importancia significativa para la reproducción de las ballenas jorobadas (*M. novaeangliae*), las cuales migran desde la región sur del continente americano durante el invierno austral (Stock G), desempeñando un papel esencial en su ciclo reproductivo, para llevar a cabo procesos fundamentales como el parto y la lactancia (Guevara-Medina., 2018). Las condiciones costeras resguardadas de esta región proveen un hábitat propicio para el desarrollo temprano de las crías. Adicionalmente, la relativa tranquilidad de estas aguas costeras proporciona un refugio vital para el crecimiento y fortalecimiento de los ballenatos antes de emprender la migración de retorno hacia áreas de alimentación en aguas más frías. En este contexto, la preservación y gestión adecuada de este ecosistema marino resultan imperativas para la conservación sostenible de la población de ballenas jorobadas en el Pacífico Noroccidental (Trujillo., 2014).

Sin embargo, *M. novaeangliae*, enfrenta amenazas significativas derivadas del cambio climático global, que inciden directamente en sus hábitats y patrones de comportamiento (cita xxx). El aumento de las temperaturas oceánicas altera la disponibilidad y distribución de las presas de estas ballenas, afectando negativamente su capacidad de alimentación (Seyboth et al., 2021). Además, el cambio climático ha

propiciado eventos climáticos extremos y alteraciones en los patrones oceanográficos, lo que podría tener consecuencias perjudiciales en las áreas de reproducción y migración de la especie (Bombosch., 2014).

La comprensión de los impactos del cambio climático en la distribución de las especies es esencial para anticipar y abordar los desafíos ambientales emergentes. Una forma de entender los efectos del cambio climático sobre las especies es a través de modelos de idoneidad de hábitat (Pacheco-Velásquez., 2019). Estos modelos desempeñan un papel fundamental en esta tarea, proporcionando herramientas analíticas que permiten evaluar cómo los factores climáticos influyen en la presencia y distribución geográfica de las especies (Putra & Mustika., 2021). Estos modelos no solo permiten proyectar posibles escenarios futuros, sino que también facilitan la identificación de áreas críticas para la conservación y la comprensión de las respuestas adaptativas de las especies frente a cambios ambientales. En el contexto del cambio climático, los modelos de distribución se convierten en una herramienta invaluable para prever la manera en que las especies responderán a las alteraciones en las condiciones climáticas, proporcionando así información crucial para el diseño de estrategias efectivas de conservación y gestión ambiental, permitiendo así una toma de decisiones informada y proactiva en el ámbito de la conservación biológica (Breen et al., 2016.).

En el presente estudio, se llevó a cabo la modelación de la idoneidad del hábitat actual y futura de la ballena jorobada en las costas de Colombia y Panamá, considerando dos horizontes temporales y dos escenarios climáticos. Esta región constituye la zona reproductiva del stock G de la especie (Felix et al., 2009). Para llevar a cabo este análisis, se empleó el algoritmo de máxima entropía (MaxEnt). Esta línea base identificará diferencias en la preferencia de hábitat y ocurrencia en la especie presente en el área y en última instancia, informará la gestión y conservación de esta especie en las Áreas Protegidas de Colombia y Panamá.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio hace parte del ETPS (Eastern Tropical Pacific Seascape, por sus siglas en inglés) el cual incluye las Zonas Económicas Exclusivas (ZEE) de Colombia y Panamá. De acuerdo con la Cancillería de Colombia, las ZEE son regiones en donde los gobiernos ejercen sus derechos para llevar a cabo actividades de exploración y explotación de recursos naturales, tanto vivos (pesca) como no vivos (minería), y toma las medidas necesarias para la preservación de estos. Esta área abarca una amplia extensión de aguas que se extiende desde las costas de ambos países hasta una distancia de 200 millas náuticas (aproximadamente 370.4 kilómetros) desde la costa, y contiene una variada diversidad de ecosistemas marinos (Art 57 CNUDM).

La selección de las Zonas de Exclusión Económica (ZEE) en el océano Pacífico de Colombia y Panamá se fundamenta estratégicamente en su alineación con las áreas cruciales de cría y apareamiento del stock G de la ballena jorobada. Esta decisión busca preservar hábitats clave para el ciclo reproductivo de estas ballenas, reconociendo la importancia de conservar poblaciones específicas reconociendo la importancia de proteger la diversidad genética y la viabilidad a largo plazo de esta especie (Espinosa de los Monteros Silva., 2015), además, la designación de estas áreas como prioritarias permite la implementación de medidas efectivas para reducir las amenazas antropogénicas y fomentar prácticas de manejo sostenible.

Análisis de datos

Ocurrencias de la especie

Los datos de ocurrencia de *M. novaeangliae* fueron tomados del Sistema de Información Ambiental Marino – SIAM (<http://siam.invemar.org.co>) desarrollado por el Instituto Colombiano de Investigaciones Marinas (INVEMAR), Ocean Biodiversity Information System – OBIS (<https://obis.org/>), Sistema Global de Información sobre Biodiversidad – GBIF (<https://www.gbif.org/>) y iNaturalist (<https://www.inaturalist.org/>). Posteriormente, las bases de datos obtenidas se cortaron mediante una máscara en formato vectorial y se procedió a descargar cada una de las tablas de atributo en formato “valores separados por comas” (.csv) y así realizar depuración de datos, eliminación de valores vacíos (NA) y duplicados. Los datos obtenidos se proyectaron en una capa tipo Shape de multipuntos en el programa QGIS V3.32.3 (<https://www.qgis.org/>). Así mismo, se eliminaron las ocurrencias atípicas, junto con aquellas ocurrencias fuera del área de estudio. Por último, se verificó que las coordenadas estuvieran en el mismo sistema de georreferenciación para así evitar problemas durante la modelación y análisis.

VARIABLES BIOCLIMÁTICAS

Para la modelación del escenario presente y los futuros se tuvieron en cuenta tres variables dinámicas y dos variables estáticas. Se eligieron este conjunto de variables debido al efecto potencial de las mismas sobre la función fisiológica de *M. novaeangliae*. Las variables dinámicas fueron la temperatura promedio de la superficie del mar, salinidad promedio y velocidad promedio de las corrientes (Bio-Oracle; Assis et al., 2018; Tyberghein et al., 2012). Para las variables estáticas se tuvieron en cuenta, la batimetría y la distancia a la costa.

Para las proyecciones futuras se utilizaron los modelos de circulación del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados fase 5 (“Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5” CMIP5, por sus siglas en inglés) obtenidas del sitio web Bio-ORACLE (<https://www.bio-oracle.org/>) tanto en datos del presente como con una proyección bajo escenarios de vías de concentración representativas RCP26 (gran esfuerzo para frenar la concentración de gases de efecto invernadero) y RCP85 (peor escenario posible debido a un esfuerzo mínimo para frenar las emisiones de gases de efecto invernadero) en horizontes de tiempo del 2050 y 2100 para la región de estudio. Por último, las capas arrojadas fueron recortadas para las ZEE seleccionadas haciendo uso de la opción de extracción por capa vectorial en QGIS.

Modelación de idoneidad de hábitat

El modelo de idoneidad de hábitat de *M. novaeangliae* se realizó mediante el algoritmo de máxima entropía utilizando el software MaxEnt en su versión 3.4.4 el cual se basa en calcular la máxima aleatoriedad en condiciones que han sido preseleccionadas (Reina-Rodríguez, Rubiano, Castro Llanos, & Otero, 2016) haciendo uso del lenguaje JAVA. Esta herramienta predictiva nos permite calcular los patrones ambientales espaciales que componen la distribución potencial de cualquier especie (Phillips & Dudík, 2008). Empleando únicamente registros de presencia, MaxEnt elabora un modelo de distribución de idoneidad de hábitat al reducir la entropía entre las probabilidades estimadas, las cuales se derivan

Para la elaboración del modelo en MaxEnt se utilizó el 70 % de los datos para el desarrollo del modelo y el 30 % fue usado bajo la función de dato experimental. Por otra parte, se implementaron 10 réplicas de tipo submuestra con el uso de una semilla aleatoria. Se implementó un análisis Jack-knife para estimar importancia para las variables seleccionadas. Se obtuvo en cada uno de los modelos la “Característica Operativa del Receptor” (ROC) y la importancia relativa y el valor del área bajo la curva (AUC) para verificar el desempeño del modelo. Los archivos de salida se usó el formato logístico, debido a que los resultados pueden interpretarse como la probabilidad de presencia de la especie (Merow et al. 2013). Para las proyecciones futuras de 2050 y 2100 se mantuvieron los parámetros indicados con anterioridad con la obtención del promedio entre los modelos (AOGCM).

Comparativa del modelo con las Áreas Protegidas

Fue utilizado el resultado del modelo de idoneidad de hábitat de *M. novaeangliae* considerando los escenarios RCP26 y RCP85 de los horizontes de tiempo 2050 y 2100. Para llevar a cabo esta evaluación, se cargó la capa que representa la media de los resultados obtenidos por el modelo en el software QGIS para posteriormente superponer de las capas vectoriales correspondientes a las Áreas Protegidas de Colombia y Panamá. Esto permitió visualizar de manera efectiva la relación entre la delimitación actual de cada área y las proyecciones de idoneidad de hábitat para la especie en cuestión. la identificación de posibles coincidencias o divergencias espaciales entre las áreas designadas como protegidas y las proyecciones de hábitat generadas por el modelo.

Resultados

Ocurrencia de la especie

Se obtuvieron un total de 607 datos de ocurrencia provenientes de la especie *M. novaeangliae* (Figura 1) tomada en cuenta para el desarrollo de los modelos de idoneidad de hábitat. Las ocurrencias se recopilaron principalmente de la base de datos SIAM (56.6%), seguido de OBIS (27.5%), iNaturalista (10.0%) y finalmente GBIF (5.8%) (Figura 1).

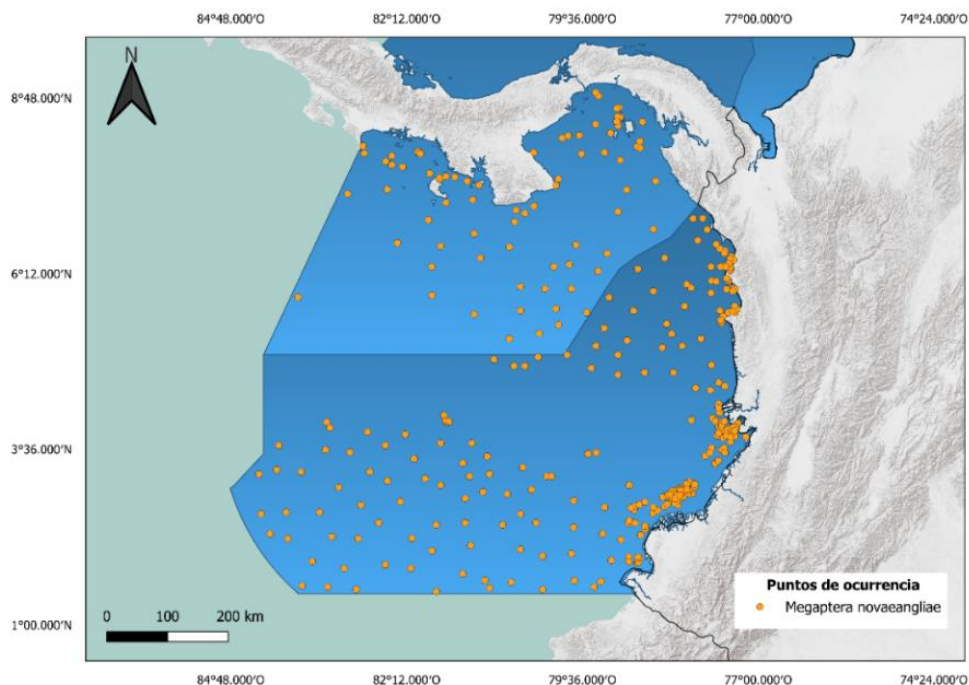


Figura 1. Puntos de ocurrencia obtenidos para *M. novaeangliae* en las ZEE seleccionadas para el estudio.

Desempeño de las variables en el modelo

El modelo mostró un adecuado desempeño, evidenciado por un valor de Área Bajo la Curva (AUC) mayor a 0.80 (Figura 2). Este resultado refleja una fiabilidad en las predicciones del modelo, destacándose por su eficacia al prever la idoneidad del hábitat para *M. novaeangliae*. El desempeño del modelo implementado muestra su capacidad para brindar estimaciones más precisas y significativas sobre la aptitud del hábitat para las ballenas jorobadas.

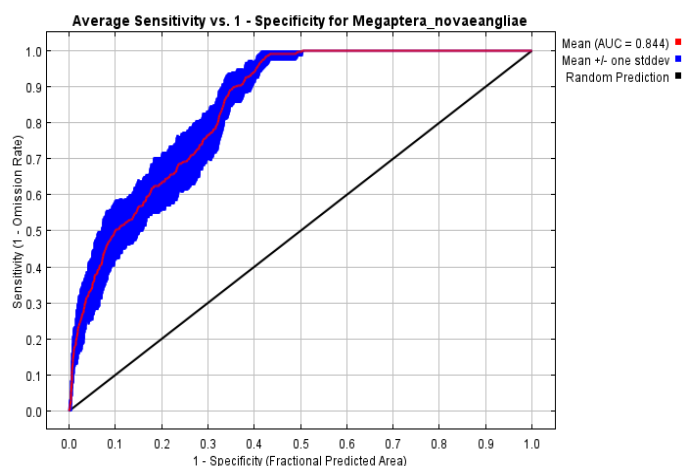


Figura 2. Desempeño del modelo MaxEnt para *M. novaeangliae*. El área bajo la curva (AUC) muestra un excelente desempeño con un valor por encima de 0.80.

La aplicación de la prueba Jack-Knife evaluó la importancia de las variables bioclimáticas en la distribución potencial de *M. novaeangliae* proporcionando la robustez y la fiabilidad del modelo, generalizando y adaptándose a diferentes condiciones climáticas (Figura 3).

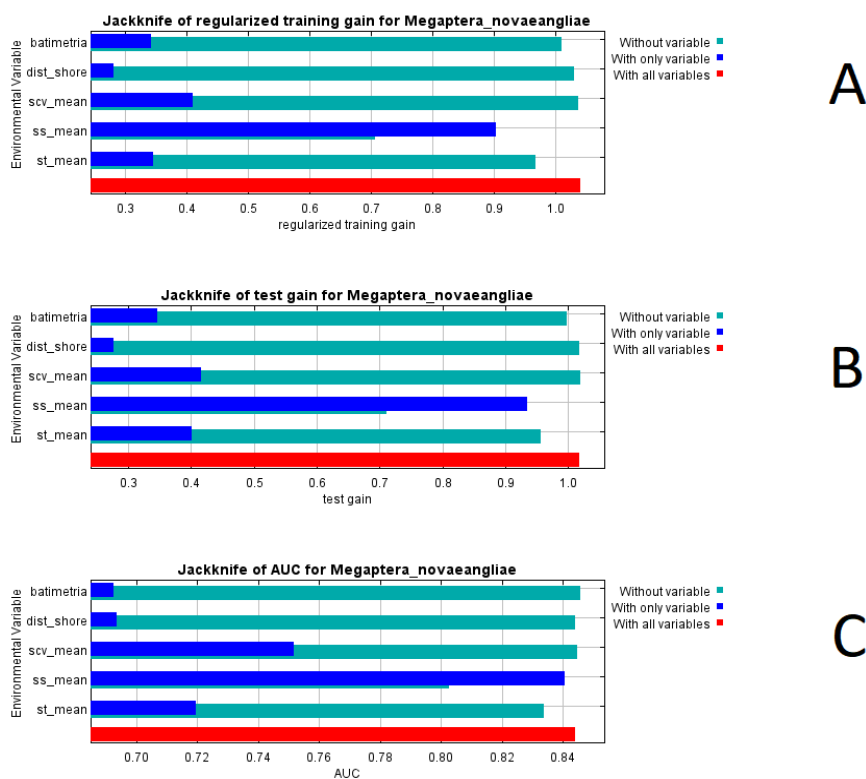


Figura 3. Prueba Jack-Knife utilizada para la medición de la importancia en cada una de las variables bioclimáticas en la distribución potencial de *M. novaeangliae*. A) Jack-knife con datos de entrenamiento. B) Jack-knife con datos de prueba. C) Jack-knife con AUC en datos de prueba.

Las curvas de respuesta de las variables en el modelo MaxEnt muestran cómo cambia la probabilidad predicha de presencia a medida que se varía cada variable ambiental, manteniendo todas las demás variables ambientales en su valor medio muestral (media de 100 ejecuciones en rojo, ± 1 desviación estándar en azul) (Figura 4).

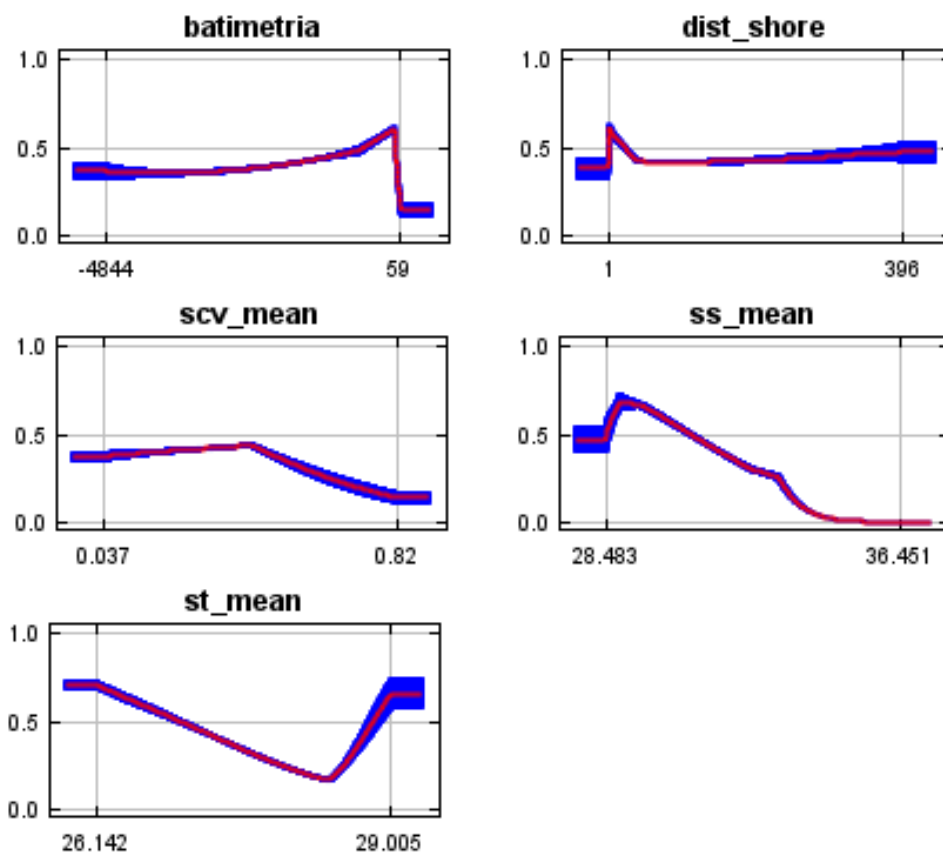


Figura 4. Curvas de respuesta de las variables bioclimáticas para *M. novaeangliae*.

Se obtuvo una representación de las estimaciones de las contribuciones relativas en base a las variables ambientales en el modelo MaxEnt. En la primera estimación, cada repetición de algoritmo de entrenamiento junto al aumento de la ganancia regularizada es sumada o restada a la contribución de la variable correspondiente si el cambio en el valor absoluto de lambda es negativo. En la segunda estimación cada variable ambiental con sus valores son puestos sobre la presencia de forma aleatoria, se evalúan los datos permutados y la caída resultante en el AUC, normalizando los porcentajes.

Las variables fueron ordenadas según su relevancia para la especie, destacando que la salinidad y la batimetría emergen como factores de mayor importancia en la construcción de un modelo de idoneidad de hábitat de *M. novaeangliae*. Por otro lado, la temperatura, la velocidad de corrientes y la distancia de la costa también desempeñan un papel significativo, contribuyendo con porcentajes considerables para la delimitación de la distribución potencial bajo los escenarios analizados en el estudio (Tabla 1.).

Tabla 1. Contribuciones relativas de las covariables en el modelo MaxEnt.

Variable	Porcentaje de contribución	Importancia de permutación
Salinidad media	69.9	83.8
Batimetría	17.4	4.4
Temperatura de la superficie	8.6	7.9
Velocidad de las Corrientes marinas	2.7	1.2
Distancia a la costa	1.4	2.8

Se modelaron los cinco principales factores contribuyentes (temperatura, salinidad, velocidad de corriente, distancia de la costa y batimetría) siendo la temperatura y profundidad las variables más relevantes ya que las áreas con mayor idoneidad para la aparición de ballenas jorobadas son en aguas poco profundas, a menos de 500 metros de profundidad. Por otro lado, la variable tenida en cuenta para la distancia de la costa no contribuyó de manera significativa en el modelo. En la interpretación de las referencias de color en la leyenda, se considera que las áreas resaltadas en rojo indican una probabilidad elevada, mientras que las áreas en tonos naranjas denotan una probabilidad intermedia. Por último, las áreas señaladas en verde y azul indican una probabilidad baja (Figura 5).

Proyecciones a futuro.

Se generaron un total de cuatro proyecciones futuras de los hábitats idóneos para las ballenas jorobadas en el PNO. Estos mapas captaron el potencial de idoneidad del hábitat de la especie *M. novaeangliae*, considerando distintos escenarios de emisión (RCP26 y RCP85) y proyectándolos hacia los horizontes temporales de 2040-2050 y 2090-2100. Cada uno de los cuatro modelos representan cambios en la distribución potencial de cada escenario y horizonte futuro (Figura 6), realizando su comparación con la distribución actual. La variedad de escenarios y horizontes temporales abordados en esta investigación proporciona una visión más completa y contextualizada de los posibles futuros desafíos y adaptaciones para esta especie particular en el contexto de las proyecciones climáticas.

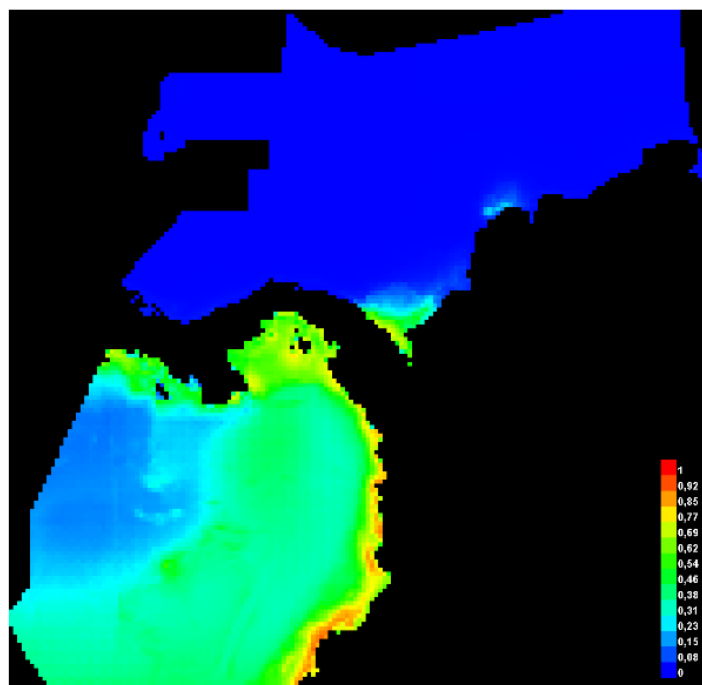


Figura 5. Distribución potencial actual de *M. novaeangliae* en MaxEnt.

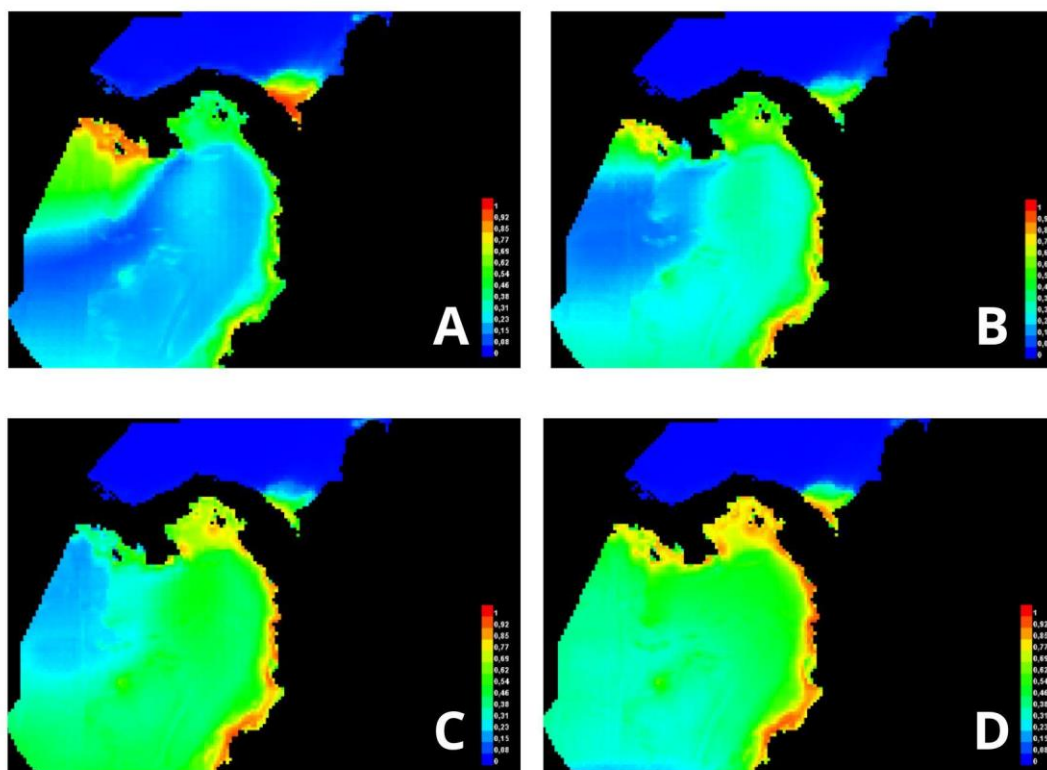


Figura 6. Modelo de idoneidad de hábitat de *M. novaeangliae*. A) Escenario RCP26 en 2050. B) Escenario RCP85 en 2050. C) Escenario RCP26 en 2100. D) Escenario RCP85 en 2100.

El modelo obtenido para *M. novaeangliae* bajo el escenario RCP26 en 2050 refleja una disminución de áreas idóneas para la supervivencia de la especie en el pacífico colombiano mientras que genera un incremento en las costas panameñas. Por otra parte, el escenario RCP85 en 2050 el mapa de idoneidad de hábitat obtenido muestra similitud con la distribución actual de la especie destacando un leve aumento en la ZEE de Panamá.

En el mapa del modelo RCP26 en 2100 se reflejó incremento en áreas costeras dentro de la ZEE de Panamá que no se encuentran en la distribución actual (Figura 6-C). El escenario RCP85 en 2100 se observan ganancias altamente significativas en áreas de la costa pacífica colombiana que no están en la distribución actual y ocupando la costa panameña en su totalidad (Figura 6-D).

Proyecciones a futuro en AP actuales

El modelo obtenido para *M. novaeangliae* en los escenarios RCP26 Y RCP85 en los horizontes de tiempo 2050 y 2100 fue cargado en QGIS en conjunto con las capas de delimitación de las AP de Colombia con el objetivo de realizar una comparación entre las proyecciones de idoneidad de hábitat generadas por el modelo y la actual delimitación de cada una de las Áreas Protegidas marítimas y costeras ubicadas en la región del Pacífico colombiano y panameño (Figura 7).

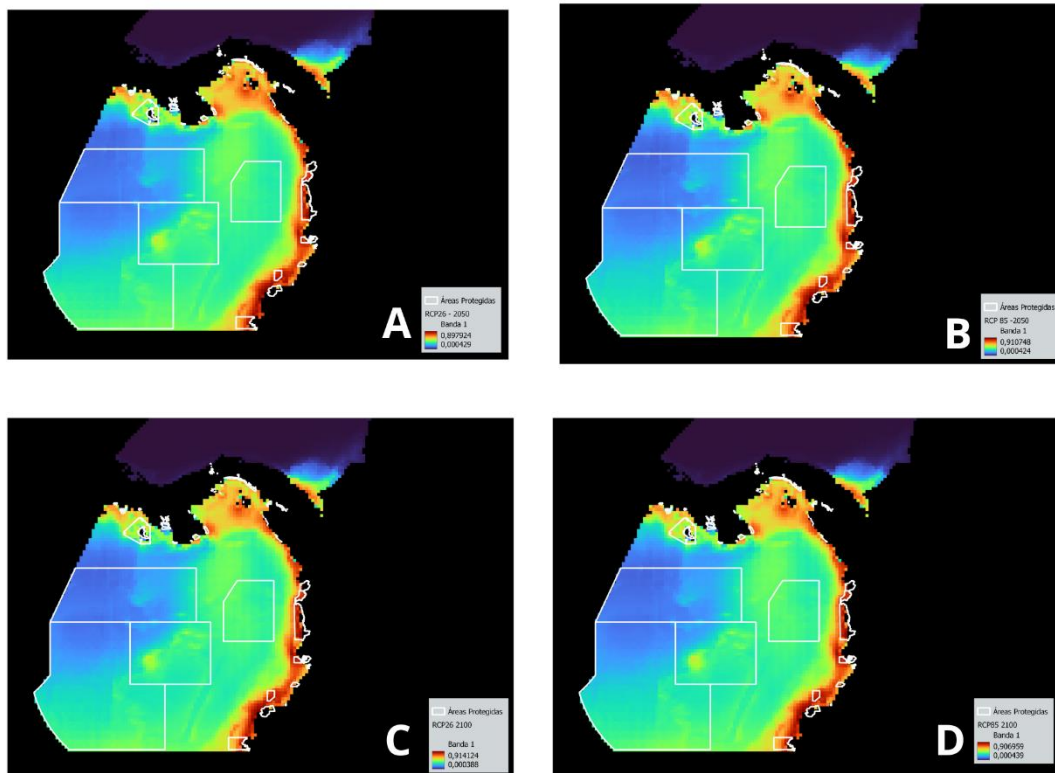


Figura 7. Áreas protegidas marítimas y costeras del pacifico colombiano y panameño A) Escenario RCP26 en 250. B) Escenario RCP85 en 2050. C) Escenario RCP26 en 2100. D) Escenario RCP85 en 2100.

Las proyecciones de idoneidad de hábitat también fueron comparadas con la delimitación actual del PNN Isla Gorgona, Uramba Bahía Málaga y Utría (Figura 8), Áreas Protegidas de Colombia que son de gran importancia para la reproducción y apareamiento de la ballena jorobada

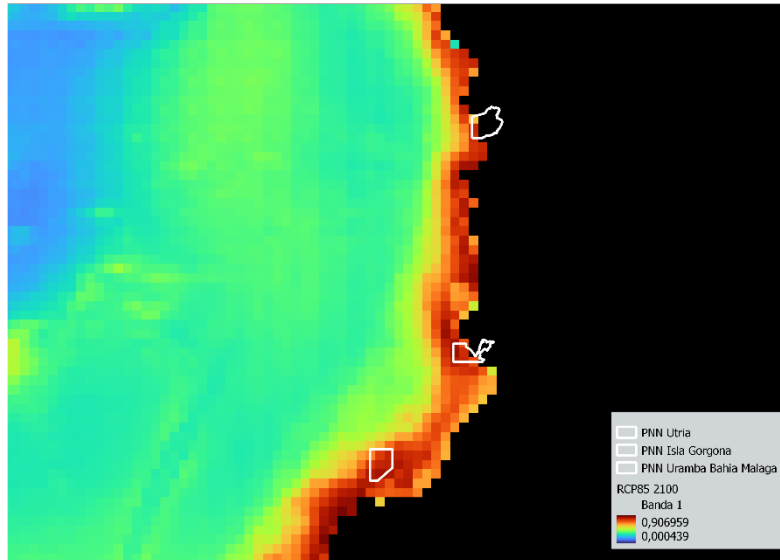


Figura 8. PNN Isla Gorgona, Uramba Bahía Málaga y Utría superpuesto bajo escenarios de RCP85 con proyección en el 2100.

Discusión

Este estudio determina a través de modelos de idoneidad de hábitat del presente y escenarios futuros, las áreas idóneas para *M. novaeangliae* en su zona de reproducción del pacífico noroccidental, la cual coincide con las ZEE de Colombia y Panamá. Los resultados de los modelos combinados con la información de las áreas protegidas permiten plantear planes de manejo tanto en el presente como a futuro teniendo en cuenta los posibles cambios generados por el cambio global.

M. novaeangliae es una especie con amplia distribución, abarcando una gran variación ambiental. Esto puede ser problemático a la hora de generar modelos de distribución por tener una tendencia a la subpredicción (Gonzales et al. 2011). Sin embargo, el desempeño del modelo fue bastante bueno. MaxEnt como algoritmo de datos de sólo presencia, es útil para determinar patrones de distribución potenciales de especies marinas como los cetáceos (Araujo & New, 2007; Hirzel et al., 2002; Marmion et al., 2009), porque la presencia-ausencia sistemática de la información sobre especies marinas es escasa y difícil de obtener, particularmente en países en desarrollo como Colombia y Panamá, donde no se han establecido programas de monitoreo a largo plazo de mamíferos marinos (Barragán-Barrera et al., 2019). Debido a que la mayoría de los datos de presencia de cetáceos en Colombia provienen de avistamientos oportunistas o no sistematizados con diferentes esfuerzos, que solo brindan información de presencia (Barragán-Barrera et al., 2019), este estudio proporciona buenos conocimientos sobre el patrón de distribución para enfocar futuras investigaciones de ballena jorobada y cetáceos en el país.

M. novaengliae presenta una combinación de variables estáticas y dinámicas que podrían influir en los patrones de distribución presentes y futuros. Este patrón general está en concordancia con la hipótesis de partición de nicho, que permite la estructuración de las comunidades y promueve la diversidad (Leibold 1995). Estas variables fueron la salinidad promedio, la batimetría y, por último, la temperatura de la superficie. Se ha propuesto que la salinidad es un predictor importante para las ballenas jorobadas en algunas zonas de alimentación (p. ej., el sistema actual del norte de California; Tynan et al. 2005), sin embargo, no se ha informado de ninguna actividad de alimentación evidente para la especie en la zona de reproducción a lo largo del Pacífico sureste.

En el modelo predictivo de distribución de mamíferos marinos implementado por Putra et al., (2021) se informa que las variables oceanográficas estáticas están relacionadas con la preferencia fisiográfica de los cetáceos, donde la preferencia por la profundidad del agua es un reflejo de sus limitaciones fisiológicas y preferencias dietéticas (Cañadas et al., 2002; Yen et al., 2004). La batimetría es una de las variables más importantes para explicar la preferencia de hábitat de siete especies de cetáceos ubicados en el nor-oeste del mar de Savu. Estas siete especies no abarcaban la presencia de la ballena jorobada, pero de igual manera los resultados terminan siendo similares a la hora de comparar la idoneidad de hábitat de los mamíferos marinos alrededor del mundo ya que estos cuentan con una distribución cosmopolita.

Los modelos muestran que, tanto para el presente como el futuro, las costas del pacífico colombiano y panameño parecen ser importantes para esta especie. Las inmediaciones de la isla Malpelo también parece ser un lugar idóneo, aunque en menor medida. Esta cercanía a las costas podría estar relacionado con el hecho de que las ballenas jorobadas prefieren aguas poco profundas para proteger a los ballenatos de los depredadores (Steiger et al., 2008).

Las proyecciones del modelo en los horizontes de tiempo son considerablemente distintas en algunos escenarios futuros en donde se puede observar un cambio inusual en la distribución de las ballenas jorobadas en el Pacífico colombiano y panameño bajo el escenario RCP26 en el horizonte de tiempo del 2050 (Figura 7A). En comparación con los resultados obtenidos por los distintos escenarios y horizontes implementados, se considera la posibilidad de cambios locales en las condiciones oceanográficas que podrían estar ocurriendo en el Pacífico colombiano y no en el panameño, haciendo que estos no se reflejen de manera tan prominente a comparación de otros escenarios. Estos cambios podrían estar influenciando la disponibilidad de hábitats o áreas de reproducción de las ballenas y a su vez teniendo en cuenta que pequeñas variaciones en las entradas del modelo o en la representación de los procesos climáticos podrían llevar a resultados divergentes, especialmente en escalas regionales más detalladas.

El modelo de idoneidad de hábitat de *M. novaeangliae* bajo el escenario RCP 85 en 2050 refleja una similitud con el potencial actual de distribución en el pacífico colombiano con un incremento considerable en las costas panameñas. Es importante comprender a profundidad el aumento de la idoneidad de hábitat frente a las costas de Panamá, para así poder preverse ante posibles cambios que afecten la reproducción, gestación y migración de la ballena jorobada.

En el análisis de los escenarios RCP85 proyectados hasta el horizonte temporal 2100, se observa un notorio aumento en el área de idoneidad para la ballena jorobada (Figura 7-D). Este fenómeno podría estar vinculado a la preferencia de la especie por temperaturas más elevadas cobrando una relevancia

crítica de la temperatura en la ecología de las ballenas jorobadas (Rubianes-Landázuri., 2015). Esta preferencia térmica, evidenciada en la expansión de las áreas consideradas óptimas para la especie, podría estar impulsando desplazamientos geográficos significativos.

Los patrones espacio-temporales de idoneidad del hábitat predichos por el modelo concuerdan bien con el conocimiento actual sobre la ecología de la ballena jorobada que predice condiciones de hábitat adecuadas consistentemente en el pacífico Noroccidental, lo que concuerda con la descripción de las ballenas jorobadas como una especie de aguas abiertas (Ainley et al., 2003). La complejidad de la ecología de las ballenas jorobadas subraya la importancia de utilizar estos modelos de manera complementaria, integrando información contextual sobre el comportamiento y la biología de la especie.

Enfocándonos en la influencia del cambio climático en los modelos de idoneidad de hábitat de la ballena jorobada, este estudio proporciona una visión esclarecedora de cómo las proyecciones futuras pueden afectar la distribución de la especie en las aguas frente a las costas de Colombia y Panamá. La consideración de escenarios climáticos del CMIP5 revela que el cambio climático probablemente desplazará a la especie hacia diferentes direcciones en busca de áreas con condiciones más favorables. Este desplazamiento puede apoyarse en estudios previos que han evaluado el balance de amenazas en mamíferos marinos (Learmonth., 2006), subrayando la necesidad de comprender las complejas interacciones entre el cambio climático y las poblaciones de ballenas jorobadas. Si bien la implementación de los escenarios climáticos del CMIP5 ha sido esencial para la formulación de nuestro modelo de idoneidad de hábitat de la ballena jorobada, es imperativo reconocer el avance de la investigación y la disponibilidad de datos. Aunque los resultados actuales ofrecen una valiosa visión de las posibles tendencias futuras, se hace evidente la necesidad de una actualización continua de estos escenarios para mejorar la precisión y aplicabilidad del modelo.

Los efectos directos más probables de los cambios en la temperatura del agua sobre los mamíferos marinos son la variación en el desplazamiento en las áreas de distribución de las especies, ya que éstas buscan las condiciones de temperatura preferidas o requeridas para su ecología. Las ballenas jorobadas tienen menos probabilidades de verse directamente afectadas por los cambios de temperatura, en comparación con otros mamíferos marinos, debido a su movilidad y capacidad de termorregulación, aunque las crías pueden ser más susceptibles que los adultos (CBI 1997). Teniendo en cuenta esto, el pacífico colombiano y panameño es un sitio ideal para el cuidado parental de la especie por lo que este aumento de temperaturas tiene que ser estudiado a profundidad con el objetivo de tener conocimiento del estado de esta especie en los territorios mencionados.

Las áreas protegidas son una de las principales herramientas en conservación. Los resultados de este estudio sugieren que estas podrían no ser suficientes para albergar a la ballena jorobada de manera efectiva, especialmente en las zonas donde la idoneidad del hábitat está proyectada a aumentar. Las áreas de mayor idoneidad del hábitat pueden desplazarse hacia regiones actualmente no cubiertas por las medidas de protección existentes. Esto plantea la interrogante de si las áreas protegidas fueron inicialmente diseñadas teniendo en cuenta los posibles cambios en el hábitat marino debido al cambio climático.

La ampliación de las áreas protegidas debe ser justificada científica y ecológicamente en base a los datos específicos obtenidos en esta investigación ya que estas áreas protegidas sirven como entornos cruciales

para la reproducción, alimentación y otros comportamientos vitales de la especie. La expansión de las áreas protegidas es, por lo tanto, esencial para mantener la integridad de estos procesos ecológicos. La conservación exitosa de la ballena jorobada en la ZEE del Pacífico colombiano y panameño en el contexto del cambio climático implica la toma de medidas concretas para la ampliación de áreas protegidas. La necesidad de adaptar las estrategias de conservación a las proyecciones cambiantes del hábitat es crucial para garantizar la supervivencia a largo plazo. La ampliación de áreas protegidas no solo representa una medida de precaución, sino una acción necesaria para preservar la biodiversidad marina en un entorno en constante cambio. Por lo tanto, se requiere una investigación continua y una colaboración internacional para abordar estas complejas cuestiones y proteger adecuadamente la biodiversidad marina en un mundo en constante cambio (Doughty et al., 2019).

El Parque Nacional Natural Isla Gorgona, Utría y Uramba Bahía Málaga se encuentran dentro de las zonas con mayor probabilidad de ser hábitats adecuados para la ballena jorobada tanto en su distribución presente como futura. No obstante, su mapeo y delimitación actual podrían considerarse limitados especialmente al anticipar futuros escenarios en los cuales se espera que la distribución de la ballena jorobada sea más extensa de lo que se observa en la actualidad. Estos lugares, a pesar de su importancia actual como hábitats potenciales, podrían no estar completamente representativos de la futura distribución de la ballena jorobada, dada la posibilidad de cambios en su migración y patrones de comportamiento.

Conclusiones

El presente estudio ha revelado cambios significativos en la idoneidad del hábitat de la ballena jorobada en el Pacífico colombiano y panameño bajo los escenarios climáticos RCP26 y RCP85 para los horizontes temporales de 2050 y 2100. La evaluación del modelo de idoneidad del hábitat ha indicado alteraciones en la distribución espacial de la especie, anticipando un aumento considerable en su presencia alrededor de las áreas protegidas marítimas y costeras de Colombia (Figura 8). Esto establece la necesidad de expandir las áreas protegidas existentes para garantizar la conservación efectiva de la ballena jorobada y su hábitat.

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera invaluable a la realización de este trabajo de grado. En primer lugar, deseo reconocer la destacada labor de mi director, Daniel Osorio Domínguez, cuya guía excepcional, enseñanza, y paciencia inquebrantable fueron el pilar más importante en cada etapa del proceso. Su total disposición para brindar conocimientos, ofrecer sugerencias, dar consejos y realizar todas las correcciones fue crucial para el desarrollo exitoso de este proyecto. En segundo lugar, agradezco el apoyo incondicional de mis padres, hermano y familia, quienes me respaldaron de manera constante. Mi reconocimiento también se extiende a mi pareja, Alejandra Muñoz, por su constante respaldo y apoyo incondicional durante la elaboración de este trabajo. En cuarto lugar, quiero agradecer a mis amigos Sergio García, Valeria Bravo, Santiago Osuna y Daniel Duclercq por su amistad, apoyo y valiosos consejos a lo largo de la elaboración de la tesis y la carrera. Su amistad hizo que el trayecto fuera más ameno. En quinto lugar, mi reconocimiento se dirige a mis

compañeros y profesores del programa de Biología, cuyos conocimientos y experiencias compartidas fueron una fuente constante de inspiración y aprendizaje. Finalmente, agradezco a la Pontificia Universidad Javeriana de Cali por brindarme la oportunidad de formarme como un profesional integral.

Literatura citada

Acevedo, J., Aguayo-Lobo, A., Allen, J., Botero-Acosta, N., Capella, J., Castro, C., Stevick, P. T. (2017). Migratory preferences of humpback whales between feeding and breeding grounds in the eastern South Pacific. *Marine Mammal Science*, 33(4), 1035–1052. <http://doi.org/10.1111/mms.12423>

Aguilar-Arakaki, R., & Vega Valencia, D. (2016). Distribución de mamíferos marinos y su relación con el krill en el estrecho de Bransfield. *ANTAR XXI*.

Ainley, D. G., Tynan, C. T., & Stirling, I. (2003). Sea ice: a critical habitat for polar marine mammals and birds. *Sea ice: an introduction to its physics, chemistry, biology and geology*. Blackwell, Oxford, UK, 240-266.

Albouy, C., Delattre, V., Donati, G., Frölicher, T.L., Albouy-Boyer, S., Rufino, M., Pellisies, M., Mouillot, D., Leprieur, F. Global vulnerability of marine mammals to global warming, *Sci. Rep.* 10 (2020), doi:10.1038/s41598-019-57280-3.

Aouinti, H., Mutahi, H., Touhami, I., Bellot, J., Khaldi, A. Observed and Predicted Geographic Distribution of *Acer monspessulanum* L. Using the MaxEnt Model in the Context of Climate Change. *Forests* 2022, 13, 2049. <https://doi.org/10.3390/f13122049>

Araújo, M. B., & New, M. (2007). Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in ecology & evolution*, 22(1), 42-47.

Assis, J., Tyberghein, L., Bosch, S., Verbruggen, H., Serrão, E. A., & De Clerck, O. (2018). Bio-ORACLE v2. 0: Extending marine data layers for bioclimatic modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 27(3), 277–284. <https://doi.org/10.1111/geb.12693>

Avila, I. C., Kaschner, K., & Dormann, C. F. (2018). Current global risks to marine mammals: taking stock of the threats. *Biological Conservation*, 221, 44–58.

Avila, I.C., & A. Giraldo. 2022. Áreas en riesgo para los mamíferos marinos en Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 70: 96-113. <https://doi.org/10.15517/rev. biol. trop..v70i1.48553>

Ávila, I.C., García, C., Palacios, D.M. & Caballero, S. (2013). Mamíferos acuáticos de la región del Pacífico colombiano. In: Trujillo, F., A. Gärtner, D. Caicedo y M. C. Diazgranados (Eds.). 2013. Diagnóstico del estado de conocimiento y conservación de los mamíferos acuáticos en Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Fundación Omacha, Conservación Internacional y WWF. Bogotá, 312 p.

Barragán-Barrera, D. C., Do Amaral, K. B., Chávez-Carreño, P. A., Farías-Curtidor, N., Lancheros-Neva, R., Botero-Acosta, N., ... & Palacios, D. M. (2019). Ecological niche modeling of three species of

Stenella dolphins in the Caribbean Basin, with application to the Seaflower Biosphere Reserve. *Frontiers in Marine Science*, 6, 10.

Bejder, M., Johnston, D. W., Smith, J., Friedlaender, A., & Bejder, L. (2016). Embracing conservation success of recovering humpback whale populations: evaluating the case for downlisting their conservation status in Australia. *Marine Policy*, 66, 137-141.

Bombosch, A., Zitterbart, D. P., Van Opzeeland, I., Frickenhaus, S., Burkhardt, E., Wisz, M. S., & Boebel, O. (2014). Predictive habitat modelling of humpback (*Megaptera novaeangliae*) and Antarctic minke (*Balaenoptera bonaerensis*) whales in the Southern Ocean as a planning tool for seismic surveys. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 91, 101-114.

Breen, P., Brown, S., Reid, D., & Rogan, E. (2016). Modelling cetacean distribution and mapping overlap with fisheries in the northeast Atlantic. *Ocean & Coastal Management*, 134, 140-149.

Bryndum-Buchholz, D.P., Tittensor, J.L., Blanchard, W.W.L., Cheung, M. Coll., E.D. Galbraith., S. Jennings., O. Maury., H.K. Lotze. Twenty-first-century climate change impacts on marine animal biomass and ecosystem structure across ocean basins, *Global Change Biol.* 25 (2019) 459–472, doi:10.1111/gcb.14512

Burrows, M. T., Schoeman, D. S., Buckley, L. B., Moore, P., Poloczanska, E. S., Brander, K. M., et al. (2011). The pace of shifting climate in marine and terrestrial ecosystems. *Science* 334, 652–655. doi:10.1126/science.1210288

Cañadas, A., Sagarminaga, R., & Garcia-Tiscar, S. (2002). Cetacean distribution related with depth and slope in the Mediterranean waters off southern Spain. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 49, 2053–2073.

Carr, M. H., Robinson, S. P., Wahle, C., Davis, G., Kroll, S., Murray, S., ... & Williams, M. (2017). The central importance of ecological spatial connectivity to effective coastal marine protected areas and to meeting the challenges of climate change in the marine environment. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 27, 6-29.

Chávez, P. (2018). Predicting cetacean habitat in the Colombian Pacific EEZ: challenges and recommendations.

Cheng, L., Abraham, J., Hausfather, Z., Trenberth, K.E. How fast are the oceans warming? *Science* 363 (2019) 128–129, doi:10.1126/science.aav7619

Chittleborough, R.G. 1965. Dynamics of two populations of the humpback whale, *Megaptera novaeangliae* (Borowski). *Australian Journal of Marine & Freshwater Research* 16: 33-128.

Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar.

Doughty, C.E., Roman, J., Faurby, S., Wolf, A., Haque, A., Bakker, E.S., Malhi, Y., Dunning, J.B., Svenning, J.C. Global nutrient transport in a world of giants, *PNAS*, 2015, doi:10.1073/pnas.1502549112.

- Espinosa de los Monteros Silva, N. Q. (2015). Análisis de diversidad genética y conectividad de ballenas jorobadas (*Megaptera novaeangliae*), mediante el análisis de la región control de ADN mitocondrial en la costa de Esmeraldas, Ecuador durante las temporadas 2010-2014 (Master's thesis, Quito, 2015.).
- Félix, F., Rasmussen, K., Garita, F., Haase, B., & Simonis, A. N. N. E. (2009). Movements of humpback whales between Ecuador and Central America, wintering area of the Breeding Stock G. Unpublished paper SC/61/SH18 presented to the Scientific Committee of the International Whaling Commission.
- Flórez-González, L., Ávila, I.C., Capella, J.J., Falk, P., Félix, F., Gibbons, J., Guzmán, H.M., Haase, B., Herrera, J.C., Peña, V., Santillán, L., Tobón, I.C. & Van Waerebeek, K. (2007). Estrategia para la Conservación de la Ballena Jorobada del Pacífico Sudeste. Lineamientos para un Plan de Acción Regional e Iniciativas Nacionales. Fundación Yubarta, Cali, Colombia. 106pp.
- García, M. Á. F. (2014). La contaminación acústica submarina: especial referencia al impacto sobre los cetáceos producido por los sónares de los buques de guerra". Números.
- González, L. M., Recagno, E. P., Cuevas, M. D. J. V., Álvarez, R. A. Z., Ramírez, L. M., & Nanduca, H. R. (2007). Distribución de las ballenas jorobadas, *Megaptera novaeangliae*, en la Bahía de Banderas y sus implicaciones para la conservación.
- Guevara Medina, S. F. (2018). Patrones espaciales de comportamiento de ballenas jorobadas (*Megaptera novaeangliae*) en la Costa norte del Ecuador (Bachelor's thesis, Quito).
- Guisan, A., Tingley, R., Baumgartner, J.B., Naujokaitis-Lewis, I., Sutcliffe, P.R., Tulloch, A.I., Buckley, Y.M., 2013. Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecol. Lett.* 16 (12), 1424–1435.
- Guzman, H. & Félix, F. (2017). Movements and Habitat Use by Southeast Pacific Humpback Whales (*Megaptera novaeangliae*) Satellite Tracked at Two Breeding Sites. *Aquatic Mammals* 43(2), 139-155.
- Haro Díaz, D. P. (2019). Rol trófico de la ballena Jorobada, *Megaptera Novaeangliae* (Borowski, 1781), y caracterización de la red trófica en el área marina costera protegida Francisco Coloane, Estrecho de Magallanes, Chile.
- Henríquez, Cristián. (2016). Impactos, vulnerabilidades y desafíos frente al cambio climático. *Revista de geografía Norte Grande*, (63), 5-8. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022016000100001>
- Herrera, J., Flórez, L., Ávila, I., Falk, P., Capella, J., & Tobón, I. (2007). Efecto de las embarcaciones de turismo en el comportamiento de grupos de cría de ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*) en Bahía Málaga, Colombia. *Memorias del Taller de Trabajo sobre el Impacto de las Actividades Antropogénicas en Mamíferos Marinos en el Pacífico Sudeste*, 88-93. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203>.
- Hirzel, A. H., Hausser, J., Chessel, D., & Perrin, N. (2002). Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data. *Ecology*, 83(7), 2027-2036.
- IPCC, 2019. Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean
- Jackson, J., Zerbini, A., Clapham, P., Constantine, R., Garrigue, C., Hauser, N., Poole, M., Baker, CS. (2008) Progress on a two-stock catch allocation model for reconstructing population histories of east

- Australia and Oceania. In: Paper SC/60/SH14 presented to the IWC scientific committee. Santiago, Chile, June 2008
- Kaufman, G. D. & P. H. Forestell. 2003. Hawaii's humpback whales: A complete whale watchers guide. Second edition. Hawaii. Pacific Whale Foundation Press. 179p
- Kopp, D.A., Stoddard, J.L., Hill, R.A., Doyle, J.M., Kaufmann, P.R., Herlihy, A.T., Paulsen, S.G., 2023. Joint species distribution models reveal taxon-specific sensitivities to potential anthropogenic alteration. *Freshw. Sci.* 42 (3) <https://doi.org/10.1086/726283>, 000-000.
- Krüger, L., Ramos, J.A., Xavier, J.C., Grémillet, D., González-Solís, J., Petry, M.V., Phillips, R.A., Wanless, R.M. and Paiva, V.H. (2018), Projected distributions of Southern Ocean albatrosses, petrels and fisheries as a consequence of climatic change. *Ecography*, 41: 195-208. <https://doi.org/10.1111/ecog.02590>
- Laidre, K. L., Stern, H., Kovacs, K. M., Lowry, L., Moore, S. E., Regehr, E. V., et al. (2015). Arctic marine mammal population status, sea ice habitat loss, and conservation recommendations for the 21st century. *Conserv. Biol.* 29, 724–737. doi: 10.1111/cobi.12474
- Leanza, U., & Caracciolo, M. C. (2014). The exclusive economic zone. The IMLI manual on international maritime law, 1, 177.
- Learmonth, J. A., MacLeod, C. D., Santos, M. B., Crick, H. Q. P., Pierce, G. J., Learmonth, J. A., et al. (2006). Potential effects of climate change on marine mammals. *Oceanogr. Mar. Biol.* 44, 431–464. doi: 10.1201/9781420006391.ch8.
- Leibold, M. A. (1995). The niche concept revisited: mechanistic models and community context. *Ecology*, 76(5), 1371-1382.
- Marmion, M., Parviainen, M., Luoto, M., Heikkinen, R. K., & Thuiller, W. (2009). Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. *Diversity and distributions*, 15(1), 59-69.
- Merow, C., Smith, M.J. and Silander, J.A., Jr (2013), A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36: 1058-1069. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>
- Millán-Nuñez, E., & Yentsch, C. M. (2000). El Canal de Ballenas, Baja California, como ambiente favorable para el desarrollo del fitoplancton. *Hidrobiológica*, 10(2), 91-100.
- Milmann, L.C., Danilewicz, D., Baumgarten, J. & Ott P.H. (2017). Temporal–spatial distribution of an island-based offshore population of common bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) in the equatorial Atlantic. *MARINEMAMMAL SCIENCE*, 33(2):496–519
- Natoli, A., Moura, A. E., & Sillero, N. (2022). Citizen science data of cetaceans in the Arabian/Persian Gulf: Occurrence and habitat preferences of the three most reported species. *Marine Mammal Science*, 38(1), 235–255. <https://doi.org/10.1111/mms.12865>

- Palacios, D.M., Gerrodette, T., García, C., Avila, I.C, Soler, G.A., Bessudo, S. & Trujillo, F. (2012). Distribution and relative abundance of oceanic cetaceans in Colombia's Pacific EEZ from survey cruises and platforms of opportunity. *J. CETACEAN RES.MANAGE.* 12(1): 45–60
- Paradinas, I., Giménez, J., Conesa, D., López-Quílez, A., Pennino, M.G., 2022. Evidence
- Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: New
- Putra, M. I. H., & Mustika, P. L. K. (2021). Maximum entropy model: estimating the relative suitability of cetacean habitat in the northern Savu Sea, Indonesia. *Marine Mammal Science*, 37(1), 6-28.
- Putra, MIH., and Mustika, PLK. Maximum entropy model: Estimating the relative suitability of cetacean habitat in the northern Savu Sea, Indonesia. *Mar Mam Sci.* 2021; 37: 6–28. <https://doi.org/10.1111/mms.12719>
- Read, A. J., Drinker, P. y Northridge, S. (2004). Bycatch of marine mammals in
- Redfern, J. V., Ferguson, M. C., Becker, E. A., Hyrenbach, K. D., Good, C., Barlow, J., ... & Werner, F. (2006). Techniques for cetacean–habitat modeling. *Marine Ecology Progress Series*, 310, 271-295.,
- Reidenberg, J. S. (2007) Anatomical adaptations of aquatic mammals. *The Anatomical Record: Advances in Integrative Anatomy and Evolutionary Biology* 290, 6: 507-513. <https://doi.org/10.1002/ar.20541>
- Reilly, S.B., Bannister, J.L., Best, P.B., Brown, M., Brownell Jr., R.L., Butterworth, D.S., Clapham, P.J., Cooke, J., Donovan, G.P., Urbán, J. & Zerbini, A.N. 2008. Megaptera novaeangliae. The IUCN Red List of Threatened Species 2008: e.T13006A3405371. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2008.RLTS.T13006A3405371.en>
- Reina-Rodríguez, G. A., Rubiano, J. E., Castro Llanos, F. A., & Otero, J. T. (2016). Spatial distribution of dry forest orchids in the Cauca River Valley and Dagua Canyon: Towards a conservation strategy to climate change. *Journal for Nature Conservation*, 30, 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2016.01.004>
- Robbins, J., Dalla Rosa, L., Allen, J. M., Mattila, D. K., Secchi, E. R., Friedlaender, A. S., Rios, E. C. (2011). Return movement of a humpback whale between the Antarctic Peninsula and American Samoa: a seasonal migration record. *ENDANGERED SPECIES RESEARCH* *Endang Species Res*, 13, 117–121. <http://doi.org/10.3354/esr00328>
- Rubianes Landázuri, F. (2015). Distribution and habitat use of the humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) in the continental coast of Ecuador and effects of sea surface temperature (SST) *Distribución y uso de hábitat de la ballena jorobada (megaptera novaeangliae) en la costa continental del Ecuador y efectos de la temperatura superficial del mar (SST)* (Bachelor's thesis, Quito: USFQ, 2015).
- S. Derville, L.G. Torres, R. Albertson, O. Andrews, C.S. Baker, P. Carzon, R. Constantine, M. Donoghue, C. Duthiel, A. Gannier, M. Oremus, M.M. Poole, J. Robbins, C. Garrigue, Whales in warming water: Assessing breeding habitat diversity and adaptability in Oceania's changing climate, *Global Change Biol.* 25 (2019) 1466– 1481, doi:10.1111/gcb.14563.

- Sanino, P., K. Van Waerebeek, M.F. Van Bresselem & L. A. Pastene. (2005). A preliminary note on population structure in eastern South Pacific common bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*. *J. Cetacean Res. Manage.* 7(1):65–70, 2005
- Schumann, N., Gales, N. J., Harcourt, R. G., and Arnould, J. P. Y. (2013). Impacts of climate change on Australian marine mammals. *Aus. J. Zool.* 61, 146–159. doi: 10.1071/ZO12131
- Seyboth, E., Felix, F., Lea, M. A., Dalla Rosa, L., Watters, G. M., Reid, K., & Secchi, E. R. (2021). Influence of krill (*Euphausia superba*) availability on humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) reproductive rate.
- Sherman, K., and Hempel, G., (2009). The UNEP Large Marine Ecosystem Report: A perspective on changing conditions in LMEs of the world's Regional Seas. UNEP Regional Seas Report and Studies No. 182. Kenya: United Nations Environment Programme. Recuperado de: www.lme.noaa.gov
- Sierra-Vasquez, M. I. (2013). Panamá y Colombia en el régimen franco o regímenes económicos especiales.
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C.P., Barnosky, A.D., Cornell, S.E., Crucifix, M., Donges, J.F., Fetzer, I., Lade, S.J., Scheffer, M., Winkelmann, M., Schellnhuber, H.J. (2018). Trajectories of the earth system in the Anthropocene, *Proc. Natl Acad. Sci.* 115 8252–8259, doi:10.1073/pnas.1810141115.
- Steiger, G. H., Calambokidis, J., Straley, J. M., Herman, L. M., Cerchio, S., Salden, D. R., ... & Barlow, J. (2008). Geographic variation in killer whale attacks on humpback whales in the North Pacific: implications for predation pressure. *Endangered Species Research*, 4(3), 247-256.
- Trujillo, F., Caicedo, D., & Diazgranados, M. C. (2014). Plan de acción nacional para la conservación de los mamíferos acuáticos de Colombia (PAN mamíferos Colombia). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Fundación Omacha, Conservación Internacional y WWF. Bogotá D.C., Colombia.
- Tynan, C. T., Ainley, D. G., Barth, J. A., Cowles, T. J., Pierce, S. D., & Spear, L. B. (2005). Cetacean distributions relative to ocean processes in the northern California Current System. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52(1-2), 145-167.
- Vidal, O. (2016). Los mamíferos marinos del océano pacífico sudeste (Panamá, Colombia, Ecuador, Perú y Chile): diagnóstico regional. CPPS AND PNUMA.
- Wang, C. and Fiedler, P.C. (2006) ENSO Variability and the Eastern Tropical Pacific: A Review. *Progress in Oceanography*, 69, 239-266. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.004>
- Wells, R. S., and M. D. Scott. (2009). Bottlenose dolphins *Tursiops truncatus* and *T. aduncus*. Pages 249–255 in W. F. Perrin, B. G. Würsig and J. G. M. Thewissen, eds. *Encyclopedia of marine mammals*. 2nd edition. Academic Press, San Diego, CA.
- western Mediterranean. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 79 (10), 1641–1654.

Yen, P. P., Sydeman, W. J., & Hyrenbach, K. D. (2004). Marine bird and cetacean associations with bathymetric habitats and shallow-water topographies: Implications for trophic transfer and conservation. *Journal of Marine Systems*, 50(1–2), 79–99.

Origen y financiación

El presente trabajo se derivó de la línea de investigación sobre los cambios de la idoneidad de hábitat de la ballena jorobada proyectada a distintos escenarios del CMIP5, ya que este es un trabajo de grado como prerequisite en la carrera de Biología, de la pontificia universidad Javeriana-Cali.

Contribución de los autores

El autor José David Cuéllar León escribió el artículo de revisión, leyó y aprobó el manuscrito final.