Modelado de nicho ecológico de *Megaptera novaeangliae* en un escenario de cambio climático en su paso por el Pacífico colombiano

Mariana del Pilar Tunjano Sánchez

Presentado para optar al título de Licenciada en Biología

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Ciencias y Educación

Proyecto curricular Licenciatura en Biología

Director

Oscar Javier Mahecha

Bogotá D.C

2023

Agradecimientos

Al igual que en otros momentos de mi vida, tengo infinita gratitud por mi Mamá porque gracias a su amor, esfuerzo, consejos y apoyo he podido llegar donde estoy y ser la persona que soy en este momento. Me siento muy orgullosa de ella, de su labor como madre y de lo que ha logrado sin dejarme nunca de lado. A mi Papá, por enseñarme a soñar en grande y por adoptar mis sueños en los de él. A mi familia porque bien o mal, mucho o poco, han hecho lo que está en sus manos por apoyarme.

A mis amigas y amigos por siempre escucharme, por creer más en mí que yo misma, por nunca dudar de mis capacidades, por impulsarme a ser mejor siempre, por ver cosas en mí que yo no veo, por sacarme una sonrisa aun en los momentos más difíciles y por nunca dejarme sola, sin importar la situación.

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por abrirme sus puertas y enseñarme tantas cosas en sus aulas tanto académicas como personales, definitivamente abrieron mi mente y corazón en muchos aspectos. A mis profesores por formarme en una disciplina tan amplia y hermosa, de la cual estoy profundamente orgullosa.

Finalmente, quiero agradecerme a mí, porque este proceso ha sido un reto personal en todos los aspectos posibles, porque a pesar de las dudas, de los malos ratos y del cansancio, decidí confiar en mi como no lo había hecho antes y estoy muy orgullosa del resultado.

Resumen

En el ecosistema marino el impacto del cambio climático influye en la abundancia, distribución y rango de migración de las especies. Por lo tanto, este proyecto de investigación tiene como fin realizar un modelamiento de nicho ecológico para la especie *Megaptera novaeangliae* de la familia Balaenopteridae, orden Cetacea, en un escenario de cambio climático en su paso por el pacífico colombiano. Para esto se emplearon datos de presencia descargados de las bases de datos GBIF y SiB Colombia y con capas climáticas obtenidas del portal Bio-Oracle versión 2.2 y por medio de R 4.2.2 y Maxent versión 3.4.3 se realizó el modelo del nicho. El estudio determina que el aumento de la temperatura global a su vez incrementa la temperatura de los océanos lo que reduce considerablemente la probabilidad de presencia de *M. novaeangliae* frente a la costa pacífica colombiana, alterando su nicho ecológico, lo cual puede traer consecuencias graves para la especie al ser este su lugar de reproducción.

Tabla de contenidos

Resumen……3

Índice de figuras……...……5

Introducción…….……....6

Planteamiento del problema y justificación…….……7

Objetivos…….……..9

Antecedentes……...…..9

Marco conceptual ……..……11

***Megaptera novaeangliae* .....……...…12**

Pacifico Colombiano …...……...…13

Variables fisicoquímicas del agua ….…….……..…14

Temperatura ….……...**14**

Salinidad ...……...**15**

Clorofila …...……...**15**

Patrón de Distribución ……..**16**

Modelado de Nicho Ecológico ……..**16**

Modelamiento de máxima entropía (Maxent) ……**17**

Rutas de concentración representativas (RCP) ……..**18**

Metodología……**18**

Área de estudio ……18

Datos de presencia …….*19*

Datos ambientales ……..*19*

Modelado de nicho ecológico …….....*20*

Resultados y análisis ……..……**21**

Determinar rangos fisiológicos ……*21*

Temperatura……...*21*

Salinidad …….*22*

Clorofila …….*24*

Escenario cambio climático …….....*25*

Presente ……*25*

Futuro RCP 4.5 …….....*27*

Futuro RCP 8.5 ……*28*

Ruta de temperatura ……*30*

Consideraciones finales ……...**31**

Referencias …….…**32**

Índice de figuras

Figura No 1. Zona Económica Exclusiva del Pacifico colombiano ……19

Figura No 2. Mapa evidenciando la temperatura mínima(a) y máxima(b) superficial del agua frente a la costa pacífica colombiana …….22

Figura No 3. Diagrama boxplot evidenciando el rango de temperatura en el que se encuentra la especie ……22

Figura No 4. Mapa evidenciando la salinidad mínima(a) y máxima(b) del agua frente a la costa pacífica colombiana ……...23

Figura No 5. Diagramas boxplot evidenciando el rango de salinidad en el que se encuentra la especie ……...23

Figura No 6. Mapa evidenciando la clorofila mínima(a) y máxima(b) en el agua frene a la costa pacífica colombiana …..……24

Figura No 7. Diagramas boxplot evidenciando el rango de clorofila en el que se encuentra la especie ……...25

Tabla 1: Valores AUC y variable ambiental que más contribuyó al modelo Maxent en el presente ….……26

Figura No 8. Modelo de distribución actual de *M. novaeangliae* en el Pacífico Colombiano. La probabilidad de presencia frente a la costa pacífica es de 0.6% ……26

Tabla 2: Valores AUC y variable ambiental que más contribuyó al modelo Maxent en el futuro con RCP 4.5 …….28

Figura No 9. Modelo de nicho RCP4.5 de *M. novaeangliae* en el Pacífico Colombiano. La probabilidad de presencia frente a la costa pacífica es de 0.10% …….28

Tabla 3: Valores AUC y variable ambiental que más contribuyó al modelo Maxent en el futuro con RCP 8.5 ……..29

Figura No 10. Modelo de nicho RCP8.5 de *M. novaeangliae* en el Pacífico Colombiano. La probabilidad de presencia frente a la costa pacífica es de 0.2% ……29

Figura 11. Rango de temperatura en el que se mueve *M. novaeangliae* ……30

Introducción

La ballena jorobada, *Megaptera novaeangliae* (Borowski, 1781) es un mamífero marino de gran tamaño, de hasta 18 metros de longitud y 40 toneladas de peso. (Bolaños et al, 2015) Estas ballenas viven en todos los océanos del mundo, viajando grandes distancias cada año ya que tienen una de las migraciones más largas de cualquier mamífero en el planeta, con un período de alimentación en latitudes altas y uno de reproducción en zonas tropicales (Slijper, 1962). Ésta especie está dividida en subpoblaciones o stocks de acuerdo con su área de reproducción (Mackintosh, 1965). La subpoblación de jorobadas del Pacífico sur oriental, denominada “Stock G” (IWC, 2001), se alimenta en aguas de la Península Antártica y Estrecho de Magallanes y en su fase reproductiva se distribuye desde el norte de Perú hasta Costa Rica, pasando por el pacífico en Ecuador y Colombia. (Pacheco, 2019)

La zona marina del pacífico colombiano presenta una alta nubosidad y pluviosidad, aguas superficiales de 25 a 26 °C y de baja salinidad. (Prahl et al., 1990; Cantera, 1993, Trujillo *et al*, 2013) Sin embargo, debido a efectos antropogénicos negativos, actualmente existen muchas presiones que afectan a los mamíferos acuáticos, siendo el aumento de la temperatura global a causa del cambio climático, una de ellas. Los océanos hasta el momento han absorbido el 93% del calor producido por los gases de efecto invernadero y la acumulación de estos gases, como el dióxido de carbono, ha provocado que las temperaturas hayan aumentado por encima del nivel estimado en los océanos. (Rohling, 2021) Por lo tanto, por

medio del principio de la máxima entropía (Maxent) se propone hacer un modelamiento de nicho ecológico de *Megaptera novaeangliae* en su paso por el pacífico colombiano suponiendo un escenario de cambio climático para determinar si el aumento de la temperatura podría interferir con las actividades que la especie viene a realizar a la costa pacífica colombiana y en consecuencia, el desarrollo normal de su ciclo de vida.

Planteamiento del problema y justificación

La actividad humana ha causado grandes impactos en el medio ambiente afectando nuestra supervivencia como la de todas las especies que habitan el planeta. (Learmonth *et al*, 2007) Miller (2007) sostiene que éste fenómeno se refiere a las modificaciones en cualquier aspecto del clima del planeta, tales como la temperatura, precipitación, intensidad y rutas de las tormentas. Los océanos han cumplido un papel muy importante protegiéndonos de los peores efectos del cambio climático ya que se han encargado de absorber aproximadamente el 93% del exceso de calor producido por la emisión de gases de efecto invernadero.(MSC, 2012) Sin embargo, el efecto del cambio climático en el medio ambiente marino tiene un impacto considerable en los ecosistemas y especies marinas, tales como cambios en la abundancia, distribución, momento y rango de migración, momento de reproducción, éxito reproductivo y, en última instancia, supervivencia. (Learmonth et al, 2006) Estudios recientes indican que el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero están llevando a los ecosistemas oceánicos a condiciones peligrosas, con riesgo asociado a una transformación ecológica irreversible. (Guldberg and Bruno, 2010) Es conocido que algunas especies de mamíferos marinos tienen preferencias en cuanto al hábitat determinadas por características físicas y químicas del agua, como lo es la temperatura, y por lo tanto no pueden salir del rango que les permite sobrevivir. (Romero, 2022) Aun así, en especies como la ballena

jorobada se presentan migraciones estacionales, es decir que se alimentan en aguas frías y se reproducen en aguas más cálidas. (Bolaños et al, 2015) La migración y el rango de migración de los mamíferos marinos ha evolucionado dentro de condiciones ambientales en constante cambio, no obstante, estos cambios ocurrieron a un ritmo que permitió a las especies adaptarse (Stern, 2002) lo que no es claro en la actualidad es si especies como la ballena jorobada podrían adaptarse al ritmo del cambio climático previsto. Ésta especie en concreto migra hacia la costa oeste de América del sur para llevar a cabo su fase reproductiva y aunque esto constituye uno de los eventos turísticos más grandes en Colombia, no se cuenta con un conocimiento básico sobre la biología y ecología de la especie que pueda soportar la toma de decisiones de manejo en esta área y debido a esto no es posible estimar o monitorear el impacto de ésta y otras amenazas. (Ávila *et al*, 2013)

De acuerdo con Pearson y Dawson (2003) una de las aplicaciones más comunes del modelo de nicho ecológico (ENM) y de los modelos de distribución de especies (SDM) es la predicción de impactos del cambio climático futuro en la distribución de especies. Es por esto, que este documento se propone analizar si el aumento en la temperatura debido al cambio climático podría afectar la distribución de *M. novaeangliae* en el paso por el pacífico colombiano y que consecuencias tendría esto para el ciclo de vida de la especie.

Objetivos generales y específicos

Objetivo general.

- Realizar un modelamiento de nicho ecológico de la especie *M. novaeangliae* determinando la idoneidad del hábitat en un escenario de cambio climático.

Objetivos específicos

- Determinar los rangos fisiológicos de *Megaptera novaeangliae* de ciertas variables del agua durante su ruta de migración.
- Realizar el modelamiento de nicho empleando un modelo de cambio climático.
- Generar una ruta de temperatura de acuerdo con las coordenadas de *M. novaeangliae*.

Antecedentes

Un individuo tiene un rango de distribución en función del tamaño corporal relativo y la movilidad, así como una variedad de otros factores, por lo tanto, los animales grandes suelen necesitar grandes áreas de distribución. (Stern, 2002) Las especies han evolucionado para reconocer y utilizar características particulares de su entorno para satisfacer sus necesidades biológicas, así mismo, las poblaciones marinas también tienden a agruparse para reproducirse, alimentarse y migrar. (Palacios *et al*, 2006)

Chávez (2018) establece una serie de modelos de hábitat de referencia para cetáceos en la Zona Económica Exclusiva del Pacífico colombiano, esperando que esta línea de base identificara las diferencias en la preferencia de hábitat y la ocurrencia entre las especies de cetáceos presentes en el área. El conjunto de datos usados para este trabajo fue solo de presencia, tomados entre el año 2000 hasta el 2017, empleando variables estáticas y dinámicas. En el caso de la ballena jorobada se lograron un total de 260 avistamientos y como resultado del estudio el autor obtuvo que las áreas con mayor idoneidad para la presencia de ballenas jorobadas, más del 70%, se encuentran en aguas poco profundas, a menos de 500 metros de profundidad. Además, la idoneidad del hábitat fue la más alta con valores de TSM entre 24,5 y 26,5 ºC, pero disminuyó con temperaturas más altas. (Chávez,

2018) Los resultados indican que noviembre es el mes con el área más idónea para las jorobadas debido a una temperatura superficial del agua más baja, sin embargo, la ocurrencia de jorobadas en este mes es muy poca porque muchas ballenas ya han iniciado su migración hacia el sur a las áreas de alimentación. (Félix & Guzmán, 2014). Los modelos muestran que hay un área más grande de hábitat pronosticado al sur lo que ha sido demostrado por un mayor número de avistamientos en el sur de la ZEE que en la región norte (Palacios et al., 2012).

Nieto (2019) realiza una guía sobre la vida de la ballena Jorobada y su paso por el pacífico colombiano, exponiendo, entre otras cosas, que en Colombia, las jorobadas han sido estudiadas en isla Gorgona, bahía Málaga, bahía Solano y sus alrededores en el departamento del choco y en el golfo de Tribuga, sitios donde llega entre junio y noviembre, y de acuerdo con la Fundación Yubarta (2002) son vistas ocasionalmente cerca de las islas Malpelo. Nieto también plantea que según Dawbin (1996) llegan primero las madres con crías para destetar, luego los jóvenes seguidos por adultos y por último las hembras preñadas y que, al abandonar la zona de reproducción, lo hacen en sentido contrario.

Finalmente, en Perú, Pacheco (2019) también realizó un modelamiento del hábitat de la ballena jorobada haciendo énfasis en la variabilidad del espacio temporal por tipo de grupo. En este caso el autor empleó las posiciones geográficas por tipo de grupo de ballenas, distancia a la costa y temperatura superficial del agua durante los meses de agosto, septiembre y octubre desde 2010 a 2017. Como resultado se obtuvo que para las ballenas solitarias o por pares el hábitat idóneo ocurre a los 2000 metros de distancia a la costa y a los 22°C pero para los grupos de tres a más ballenas el hábitat idóneo empieza desde los 1900 m de distancia de la costa hasta los 11600 m e igualmente a 22°C. Para los grupos con crías los

valores idóneos son desde los 50 a 2300m. (Pacheco, 2019) Se ha sugerido que este patrón de distribución está relacionado con la disminución del ancho de la plataforma continental hacia el norte del continente (Herrera et al., 2008). Sin embargo, se necesitan más estudios para comprender completamente las diferencias geográficas en la abundancia de ballenas jorobadas a lo largo de la costa del Pacífico y sobre la sincronización biológica y ecológica de la migración con condiciones ambientales aparentemente adecuadas en las áreas de reproducción. (Chávez, 2018)

Marco Conceptual

Se plantean 4 posibles razones por las que las ballenas jorobadas migran, i) minimizar el estrés térmico en las crías, ii) por rastreo de recursos, iii) reducir la depredación por las orcas, y por último iv) debido a un remanente evolutivo, ya que la selección natural favorece a los individuos que pueden migrar, alimentarse y reproducirse. (Clapham, 2001, Stern, 2002) Si bien estas razones no están del todo claras, en todos los océanos durante los meses de invierno a primavera, estas ballenas realizan una migración hacia latitudes tropicales y/o subtropicales para aparearse y dar a luz a sus crías, excepto por la población localizada en el mar Arábico, la cual se alimenta y reproduce en la misma región sin realizar migración (Clapham, 2009).

La subpoblación de jorobadas del Pacífico sur oriental, denominada "Stock G" (IWC, 2001), se alimenta en aguas de la Península Antártica y Estrecho de Magallanes, y en su fase reproductiva se distribuye desde el norte de Perú hasta Costa Rica, pasando por Ecuador y Colombia. (Pacheco, 2019) Aunque este evento es bastante representativo en todos los países por donde pasan las jorobadas, no se cuenta con mucha información documentada sobre el proceso, y por lo tanto hay bastantes dudas sobre la biología, ecología y patrones de

distribución de la especie aun cuando *M. novaeangliae* es de las especies más estudiadas. (Ávila *et al,* 2013)

Megaptera novaeangliae

La Ballena Jorobada tiene un aspecto característico, su cuerpo es robusto y se adelgaza de forma abrupta hacia los extremos. Las hembras adultas son más grandes que los machos, alcanzando una longitud promedio de 15 m y un máximo de 19 m, mientras que los machos tienen una longitud promedio de 14 m, con un máximo de 17.5 m. (Bolaños et al, 2015) Estos animales pesan entre 30 - 40 toneladas alcanzando un máximo de 53 toneladas. Las aletas pectorales son muy largas, aproximadamente un tercio de la longitud total y de esta característica deriva el nombre del género. (SEMARNAT, 2018) Las ballenas jorobadas son cosmopolitas y su distribución se extiende desde los trópicos hasta el margen de los hielos subpolares, presentando un ciclo migratorio anual. (Gaviria *et al,* 2011) Durante el verano se alimentan en altas latitudes en zonas de alta productividad y durante el invierno migran a regiones subtropicales de aguas someras con temperatura superficial cercana a 25 °C cerca de costas continentales, islas y bancos en donde se aparean, dan a luz y crían a sus recién nacidos durante sus primeros meses de vida (Medrano, 2002) Esta especie está dividida en tres poblaciones reproductivas y geográficamente aisladas: la del Atlántico norte, la del Pacífico norte y la del hemisferio sur, y cada población está dividida en subpoblaciones o stocks de acuerdo a su área de reproducción (Mackintosh, 1965). La subpoblación de jorobadas del Pacífico sur oriental, denominada "Stock G" (IWC, 2001), visitan entre junio y noviembre el pacífico colombiano para reproducirse y criar después de una migración de más de 8500 km, desde la península Antártica y el estrecho de magallanes en Chile. (Stevick et al. 2004; Acebedo et al. 2007) Dicho trayecto lo realizan en menos de 4 meses y constituye la

migración más larga reportada para un mamífero distinto del hombre (Stone et al. 1990; Rasmussen et al. 2002; Nieto, 2019).

Pacífico Colombiano

Colombia es un país privilegiado debido a su ubicación geográfica en el planeta tierra, ya que cuenta con 40 especies de mamíferos acuáticos que representan casi el 40% de las especies reportadas a nivel mundial. (Trujillo *et al*, 2013) El pacífico colombiano alberga el 76.3% de los mamíferos acuáticos del país, incluyendo la ballena jorobada y aunque la región cuenta con una gran proyección comercial y turística, no existe mucho conocimiento sobre la biología y ecología de las especies que pueda soportar la toma de decisiones para su manejo. (Ávila *et al*, 2013)

La región del Pacífico se extiende desde la zona noroccidental del golfo de Urabá al norte (vertiente del mar Caribe) e incluye la faja costanera del Océano Pacífico desde el límite con Panamá (Juradó), hasta la frontera con Ecuador al sur, y está limitada por el piedemonte de la Cordillera Occidental de los Andes. (Ávila *et al*, 2013) La zona marina tiene un área de 330.000 km2, lo cual representa el 35,5% del área marina nacional. Toda la cuenca del Pacífico colombiano se encuentra dentro de la región de bajas presiones atmosféricas asociada con la zona de convergencia intertropical, que se caracteriza por la presencia de vientos variables y débiles. (Trujillo *et al*, 2013) También presenta una alta nubosidad y pluviosidad, una amplitud de marea hasta de 5 metros, aguas superficiales relativamente calientes (25 a 26 °C) y de baja salinidad (entre 20-35 frente a la costa colombiana) (Prahl et al., 1990; Cantera, 1993). Las aguas oceánicas son relativamente claras, mientras que las costeras son muy turbias, cargadas de partículas en suspensión debido a los aportes de la gran cantidad de ríos que desembocan en el Pacífico, de manera que la visibilidad es baja (menos

de 50 cm) (Cantera, 199; Ávila *et al*, 2013). La región del Pacífico colombiano está influenciada por el evento conocido hoy en día como El Niño, fase cálida y La Niña, fase fría. El Niño ocasiona en el Pacífico oriental un aumento en la temperatura superficial del mar, aumento del nivel del mar y hundimiento de la termoclina, esto reduce la productividad del agua y, entre otras cosas, genera un aumento de las precipitaciones en esta zona litoral del Pacífico oriental y causa cambios en los patrones de precipitación (mientras que en Perú llueve abundantemente, en Colombia hay sequías). Durante La Niña, por el contrario, el agua se enfría lo que favorece la productividad biológica. (Wang y Fiedler, 2006; Ávila *et al*, 2013)

Variables Fisicoquímicas del agua

- ***Temperatura***

  La luz del sol calienta el agua del mar, calienta las capas superficiales, proporciona energía para el fitoplancton y ayuda en la navegación de muchos animales marinos. Este proceso está determinado por la latitud, la estación, la hora del día y la nubosidad. El agua más cálida del océano está cerca del ecuador y el agua más fría existe cerca de los polos. Sin embargo, la temperatura media del agua es de 3.50°C ya que debajo de la capa de mezcla, la temperatura del agua disminuye rápidamente con la profundidad. (Balasubramanian, 2014)

- ***Salinidad***

Es la cantidad total de sólidos disueltos presentes en el agua de mar y se determina indirectamente en función de la conductividad y la clorinidad de las aguas. El agua de mar contiene concentraciones más altas de todos los cationes y aniones, sin embargo, el

sodio y el cloruro son los más dominantes en el agua de mar y la salinidad media del océano es 34.7. (Balasubramanian, 2014)

- ***Clorofila***

La clorofila es un indicador de la abundancia de plancton fotosintético. El fitoplancton son algas unicelulares microscópicas que flotan en la superficie del océano y que contienen clorofila que les permite utilizar la energía de la luz solar para transformar el CO2 en azúcares y oxígeno mediante la fotosíntesis. La productividad del fitoplancton varía según las estaciones y las regiones. La primavera es la temporada alta para el desarrollo del fitoplancton, ya que hay mucha luz y los nutrientes han sido transportados a la superficie del océano a través de la mezcla de aguas profundas durante el invierno. (EC, 2021) Las concentraciones más altas de clorofila, se encuentran en aguas polares frías o en lugares donde las corrientes oceánicas traen agua fría a la superficie, no es el agua fría en sí misma la que estimula el fitoplancton, en cambio, las bajas temperaturas son a menudo una señal de que el agua ha subido a la superficie desde las profundidades del océano, transportando nutrientes que se han acumulado con el tiempo. (NASA, 2022)

Patrón de Distribución

La biogeografía es la disciplina que estudia la distribución de los seres vivos en el espacio y a través del tiempo, teniendo como objetivo principal comprender los patrones de distribución geográfica de las especies y taxones supraespecíficos (Morrone, 2000, Estrada et al, 2012) Un patrón de distribución por lo tanto es la existencia de una tendencia geográfica general que afecta al número de especies que existen en un determinado territorio, tal tendencia

geográfica de diversidad puede cambiar gradualmente a lo largo de un gradiente o zonificación de factores físicos. (Odum y Barrett 2008)

Modelado de Nicho Ecológico (ENM)

El modelado de distribución de especies y el modelado de nicho ecológico se basan en la teoría del nicho ecológico. Hutchinson en (1957) hizo una distinción entre el nicho fundamental, conjunto de condiciones ambientales abióticas bajo las cuales una especie es capaz de persistir indefinidamente, y el nicho realizado, la parte del nicho fundamental que está limitada por las interacciones con otras especies. Como tal, los rangos de las especies pueden concebirse como consecuencia de tres factores (Soberón y Peterson, 2005): a) la presencia de condiciones ambientales (abióticas) bajo las cuales la especie puede establecerse, sobrevivir y reproducirse; b) el entorno biótico determinado por la presencia de interacciones entre especies, como la competencia o la depredación, en el que las especies pueden persistir, y c) el área accesible a las especies a través de su movimiento o capacidad de dispersión. (Melo et al, 2020) El modelamiento de nicho ecológico (ENM) requiere una estimación explícita del nicho fundamental de la especie, y están destinados a modelar los procesos que dan forma al área de distribución de la especie, y se utilizan con frecuencia para transferir esos factores causales a proyecciones en el espacio o el tiempo (Peterson y Soberón, 2012). De acuerdo con Warren y Seifert (2011) las cuatro formas más comunes de emplear el ENM son: i) estimar la idoneidad relativa del hábitat que se sabe que ocupa la especie, ii) para estimar la idoneidad relativa del hábitat en áreas geográficas que no se sabe que están ocupadas por la especie, iii) para estimar los cambios en la idoneidad del hábitat a lo largo del tiempo dado un escenario específico para el cambio ambiental y iv) como estimaciones del nicho de la especie.

Modelamiento de máxima entropía (Maxent)

Maxent utiliza el principio de máxima entropía en datos de solo presencia para estimar un conjunto de funciones que relacionan las variables ambientales y la idoneidad del hábitat para aproximar el nicho de la especie y la distribución geográfica potencial. (Phillips et al. 2006) El principio o método de Máxima Entropía es un procedimiento para generar distribuciones de probabilidad de forma sistemática y objetiva. Se requiere de datos biológicos (lugares de presencia de las especies) y datos geográficos (las variables ambientales). (Correia, 2019) Maxent se configura solo con los registros de presencia de la especie, estimando o prediciendo las distribuciones que deben de estar de acuerdo con todo lo que se conoce de la información inferida, de las condiciones ambientales y de las localidades de ocurrencia. La ventaja de las modelizaciones de especies con Maxent y sus entornos reside en la posibilidad de modelar situaciones futuras con muestras de datos parciales o “incompletos”; es decir, que con un volumen de datos representativos se puede tratar de inferir datos complementarios. Como resultado de estos análisis, se obtienen mapas predictivos en los que se puede visualizar la distribución potencial de las especies bajo el entorno actual o futuro. (Correia, 2019)

Rutas de concentración representativas (RCP)

Las rutas de concentración representativas son un conjunto de cuatro (2.6 a 8.5) nuevas rutas desarrolladas por la comunidad del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos de la NOAA como base para experimentos de modelado a corto y largo plazo. (NOAA, 2006) Estas rutas fueron creadas acoplando varios modelos océano – atmosféricos para predecir como las emisiones de gases efecto invernadero pueden afectar al planeta, sin embargo, estas

proyecciones no integran las proyecciones socioeconómicas junto las emisiones y las climáticas, solo el forzamiento radioactivo que servirá para predecir un escenario a futuro. (Moss *et al*, 2008) En el escenario 4.5 se asumen que las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero alcanzan su punto máximo alrededor del año 2040 y luego disminuyen. (Ramirez, Botello y Navarro, 2020) Por otro lado, el escenario 8.5 es mas alejado en el tiempo y el mas extremo, debido al posible aumento de la energía radiactiva para el año 2100 como consecuencia del incremento de GEI. (Pérez *et al*, 2020)

Metodología

- ***Área de estudio***

El área de estudio se basó en la Zona Económica Exclusiva del pacifico colombiano, sin embargo, las coordenadas especificas empleadas fueron: -84.80, -70.69 W 1.37, 15.03 N. La CP-ZEE tiene un área de 330.000 km2, lo cual representa el 35,5% del área marina nacional. Ávila *et al*, 2013)

Toda la cuenca del Pacífico colombiano se encuentra dentro de la región de bajas presiones atmosféricas asociada con la zona de convergencia intertropical, que se caracteriza por la presencia de vientos variables y débiles. (Ávila *et al*, 2013)

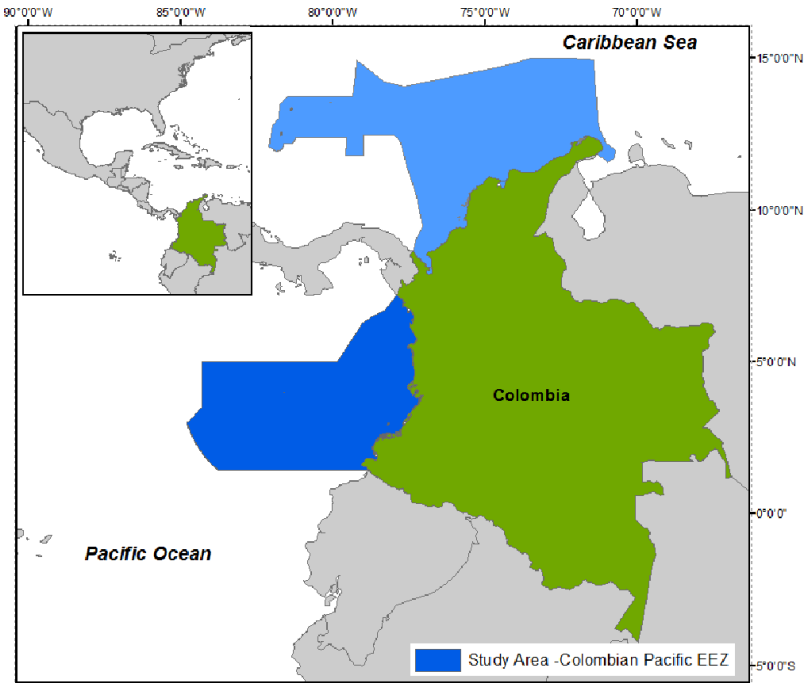

Figura No 1. Zona Económica Exclusiva del Pacifico colombiano (Fuente: Chávez,2018).

- ***Datos de Presencia***

Debido a que el presente estudio no contó con una fase de campo, los datos de presencia se obtuvieron de las bases de datos GBIF y SiB Colombia. La búsqueda se realizó por medio del nombre de la especie *M. novaeangliae* y para reducir los datos se emplearon los siguientes filtros: Estado del registro: presente, Base del registro: Observación con maquina y humana, Ubicación: Incluye coordenadas, Año: Entre 1980-2022 y finalmente, País o área: Colombia. Con esta información se realizó una matriz en Excel y por medio de la función "formato condicional" se depuraron los datos, para obtener un total de 466 registros.

- ***Datos Ambientales***

Las variables elegidas fueron temperatura, salinidad y clorofila tanto máxima y mínima para cada una de ellas. La salinidad y la temperatura son propiedades físicas fundamentales del agua de mar que impulsan la circulación termohalina global y, por lo tanto, son factores importantes en la dinámica climática global. (García *et al*, 2021) a su vez, tanto la temperatura como la salinidad afectan los valores de clorofila del agua. (Brugnoli, Vizziano y

Frouin, 2005) La descarga de estas capas se realizó en el portal Bio-Oracle versión 2.2 y en formato ASC. Las descargas se realizaron en tres momentos, el presente y para el escenario de cambio climático en el futuro comprendido entre los años 2045 y 2050, uno en RCP4.5 y el otro en RCP8.5, ambos con temperatura y salinidad como variables ambientales ya que los datos de clorofila no estaban disponibles.

- ***Extracción de datos ambientales***

Para poder realizar el ENM es necesario extraer los datos ambientales de los registros puntuales de la distribución de la especie, los cuales estaban representados en coordenadas geográficas, para esto, se empleó R 4.2.2. En primer lugar, es necesario leer el archivo con los datos de presencia, cargar las capas que serán los datos ambientales, en este caso: temperatura, salinidad y clorofila. Para que fuera más práctico, los rasters (datos ambientales) se recortaron a la extensión del área de estudio, en este caso -84.80, -70.69 W 1.37, 15.03 N. De esta forma se obtuvieron los valores específicos de temperatura, salinidad y clorofila máxima y mínima para cada punto. Posterior a esto se realizo un diagrama boxplot para determinar los rangos fisiológicos de preferencia de *M. novaenagliae.*

- ***Modelo de nicho ecológico***

En este caso se empleó un enfoque de solo presencia para modelar el nicho ecológico de las jorobadas, específicamente el paquete “dismo” versión 1.3-9 en R 4.2.2 y Maxent versión 3.4.3. Maxent estima el rango geográfico de la especie teniendo en cuenta datos geográficos y las variables ambientales. (Correia, 2019). Maxent es ideal para modelar situaciones futuras ya que puede inferir información de datos incompletos, sin embargo, por el mismo motivo es importante tener en cuenta la confiabilidad del modelo. (do Amaral et al., 2015)

Resultados y discusión

A continuación, se evidencian los resultados obtenidos en el estudio. Estos se presentarán en el mismo orden de los objetivos, empezando por la determinación de los rangos fisiológicos de preferencia de *M. novaeangliae.* En este caso se presentan dos mapas por cada variable ambiental (temperatura, salinidad y clorofila) uno evidenciando los valores máximos y el otro los mínimos, además de dos diagramas boxplot para cada variable igualmente. Seguido de esto se evidenciarán los resultados del ENM, tanto para el presente como para el futuro, con un mapa para cada caso donde se evidencia la probabilidad de presencia de la especie Finalmente, se presenta la ruta de temperatura propuesta para *M. novaeangliae,* recalcando que en este estudio no se tuvieron en cuenta tipos de grupo de la especie.

1. Determinar rangos fisiológicos

Temperatura

Tanto en la figura 2 como en la 3, se observa que los registros de presencia de la especie para temperatura mínima están ubicados en un rango entre los 24 y los 27°C, mientras que los registros de presencia relacionados con la temperatura máxima están asociados a un rango entre 28 y 29°C. Por lo tanto, es posible inferir que la temperatura de preferencia de la especie es de un rango entre los 25.5 a los 29 °C. Al comparar estos resultados con los obtenidos por Chávez (2018) quien analizó la misma especie, se observa que el rango de temperatura encontrado en este estudio es más elevado, ya que la autora determina que la idoneidad del hábitat fue más alta con valores de temperatura superficial entre 24.5 y 26.5 º C pero disminuyó a temperaturas más altas. Por otro lado, Pacheco (2019) propone que el hábitat más idóneo para distintos grupos de jorobadas es de 22 °C. Es importante recalcar que para el presente estudio no se tuvieron en cuenta los tipos de grupos de jorobadas y que los estudios mencionados se realizaron en 2018 y 2019 respectivamente, por lo tanto, es posible

inferir que la temperatura ha aumentado desde ese momento y los rangos de preferencia de la especie, también.

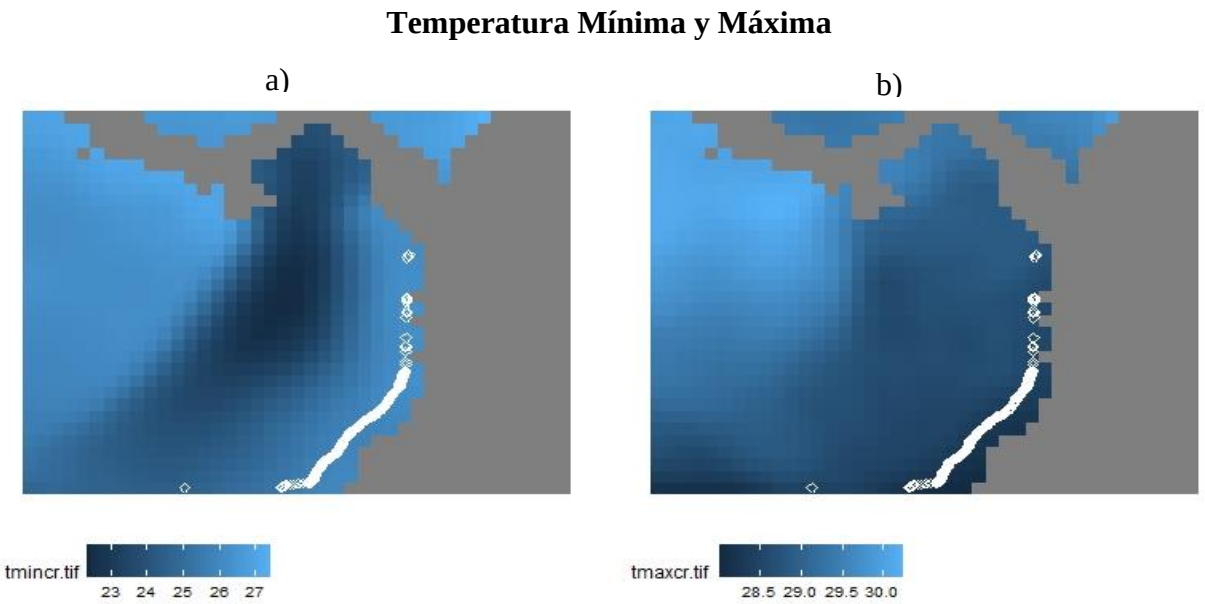

Figura No. 2 Mapa evidenciando la temperatura mínima(a) y máxima(b) superficial del agua frente a la costa pacífica colombiana junto con los registros puntuales.

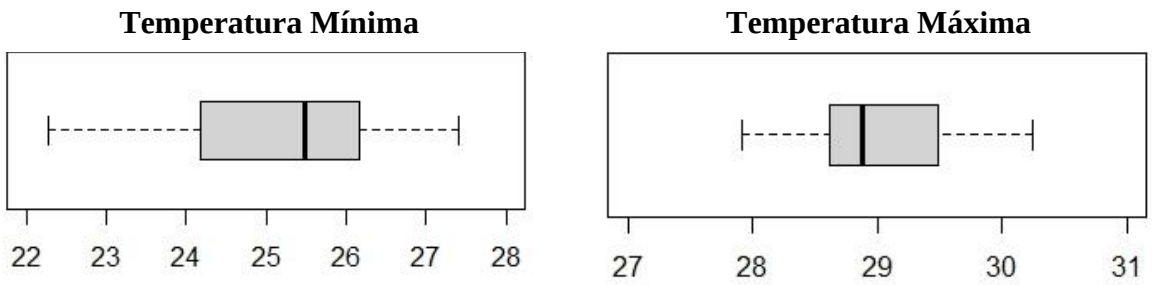

Figura No. 3. Diagrama boxplot evidenciando el rango de temperatura en el que se encuentra la especie, con los respectivos valores de preferencia.

Salinidad

En la figura 5 se observa que los boxplot presentan gran cantidad de datos atípicos o outliers los cuales influyen en el análisis de los resultados y reducen la confiabilidad, sin embargo, en la figura 4 se evidencia que los registros de presencia de la especie están ubicados en un rango entre 24 y 26 PSS para la salinidad mínima, mientras que los registros de presencia

relacionados con la salinidad máxima están asociados a un rango de 33 a 34 PSS, por lo que se puede inferir que el rango de preferencia en cuanto a la salinidad es de 24 a 33 PSS. La NASA (2022) establece que la salinidad sobre el ecuador es baja debido a la precipitación y a la gran afluencia de ríos, a su vez, García y colaboradores (2021) determinaron que la salinidad promedio en el pacífico occidental es de 33.40, lo cual concuerda con los resultados obtenidos.

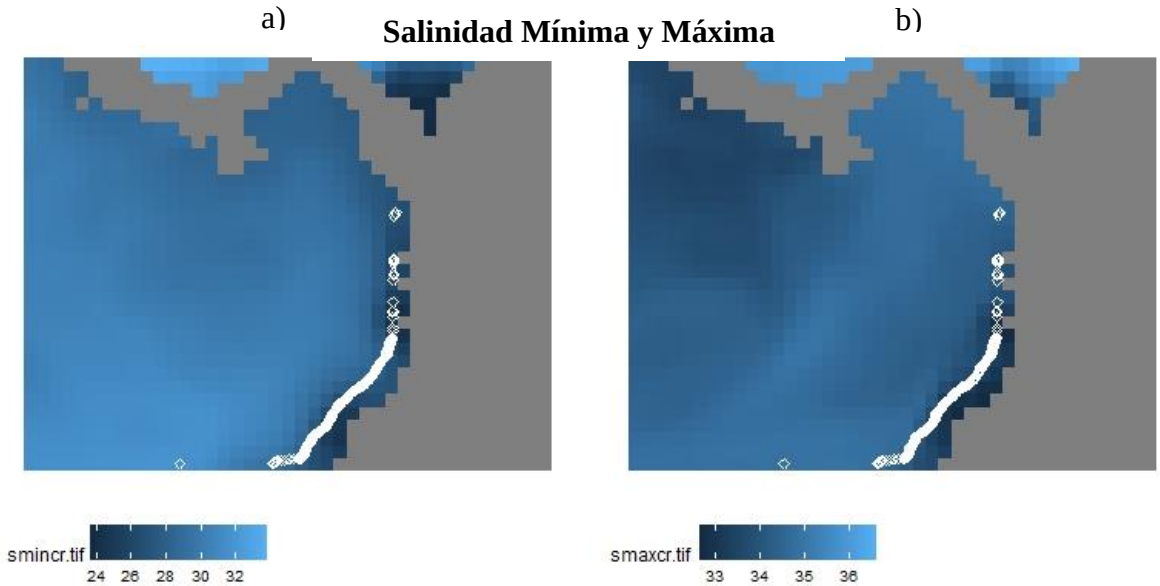

Figura No. 4. Mapa evidenciando la salinidad mínima(a) y máxima(b) del agua frente a la costa pacífica colombiana junto con los registros puntuales.

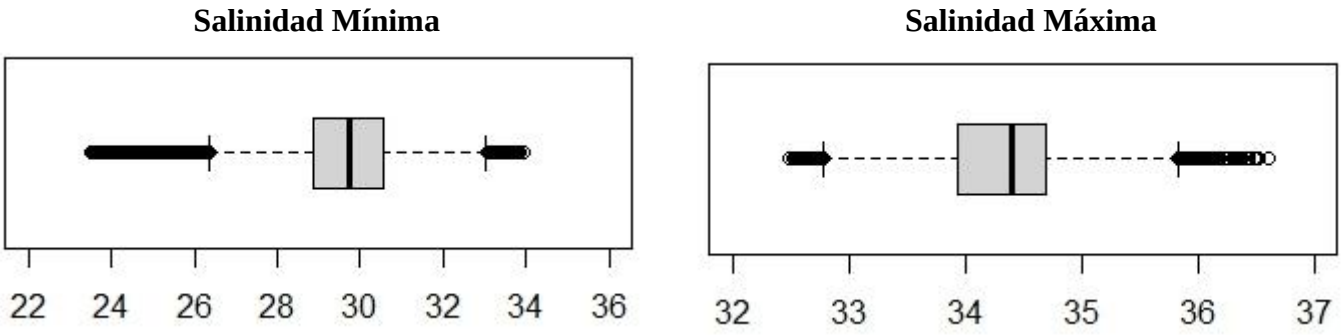

Figura No. 5. Diagrama boxplot evidenciando el rango de salinidad en el que se encuentra la especie, con los valores de preferencia. Se evidencian datos atípicos.

Clorofila

En la figura 7 se observa que los boxplot presentan gran cantidad de outliers, por lo que la confiabilidad del estudio disminuye, no obstante, en la figura 6 se evidencia que los registros de presencia de la especie están ubicados en un rango de 0,2 a 0. 3mg.m3, mientras que los registros asociados a la clorofila máxima se ubican en un rango de 2 a 3 mg.m3. De acuerdo con Espinoza y colaboradores (2001) la clorofila presenta una relación inversa con la temperatura y directa con la salinidad, por lo tanto, entre menor sea la temperatura y mayor sea la salinidad, los niveles de clorofila serán mayores. Como se pudo observar, en la costa pacífica de Colombia las temperaturas son elevadas y la salinidad es baja, por lo tanto, los valores de clorofila lo serán también. De acuerdo con esto, se puede inferir que *M. novaeangliae* tiene preferencia por un rango entre 0,2 a 3 mg.m3 de clorofila, según los datos actuales disponibles.

Clorofila Mínima y Máxima

a) b)

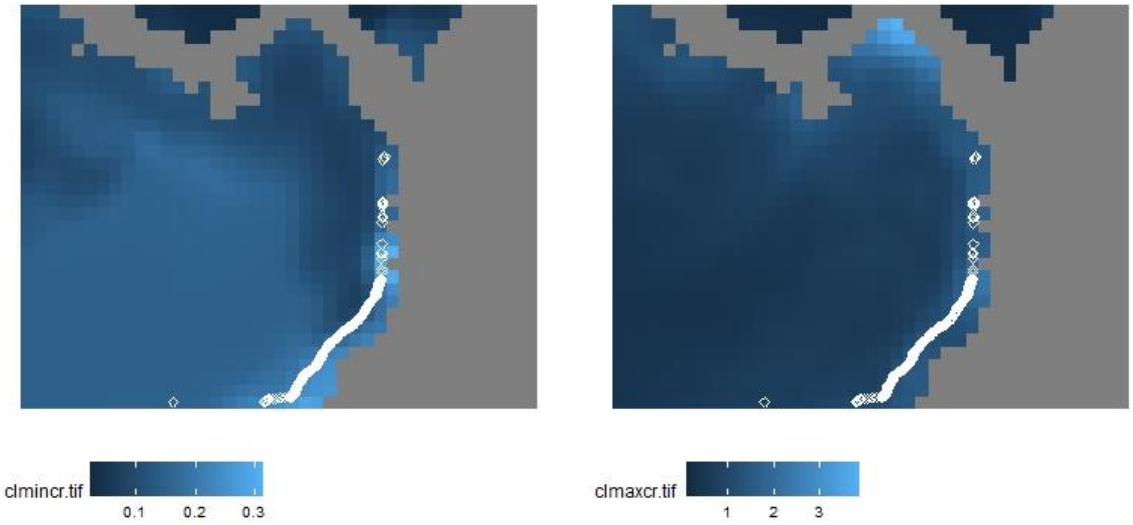

Figura No. 6. Mapa evidenciando la clorofila mínima(a) y máxima(b) del agua frente a la costa pacífica colombiana junto con los registros puntuales.

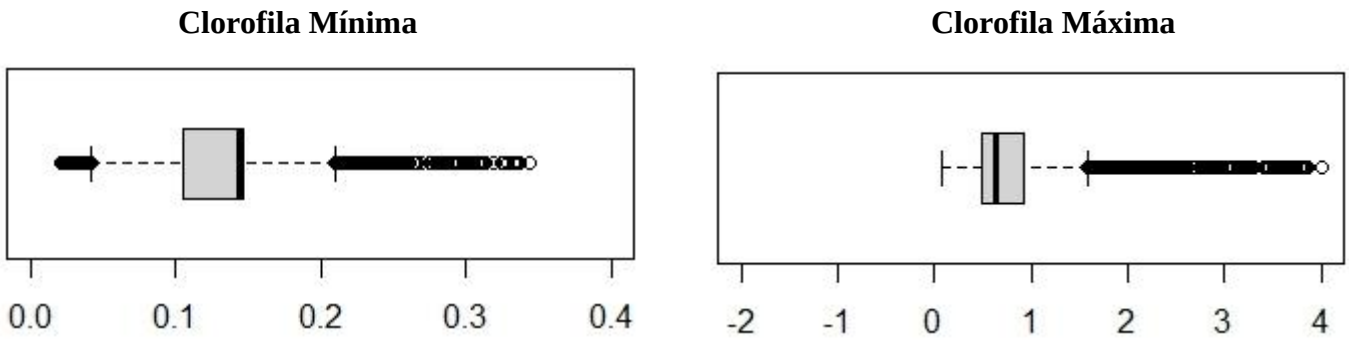

Figura No. 7. Diagrama boxplot evidenciando el rango de clorofila en el que se encuentra la especie, con los valores de preferencia. Se evidencian datos atípicos.

2. Escenario cambio climático.

Teniendo en cuenta los rangos fisiológicos establecidos con la información disponible, el estudio se concentró en hacer el modelo de nicho de *Megaptera novaeangliae* para posteriormente hacer una proyección a futuro en un escenario de cambio climático para determinar cómo cambiaria el nicho ecológico de la especie.

Presente

En la tabla 1 se puede evidenciar que el valor de AUC arrojado para los datos de prueba fue de 0.924 siendo el máximo alcanzable de 1, de acuerdo con Gutiérrez *et al* (2018), lo que quiere decir que el modelo tiene una buena confiabilidad. Adicionalmente, los valores similares de AUC (Tabla 1) para las pruebas de entrenamiento y de prueba evidencia el alto poder predictivo del modelo. El poder predictivo hace referencia a que el modelo no genere falsos positivos ni falsos negativos (Fielding & Bell, 1997). La variable que más contribuyó al modelo fue la de temperatura máxima y la que menos contribuyó fue la de salinidad máxima, posiblemente debido a que el rango de salinidad en el que *M. novaeangliae* se encuentra son valores bajos. En el mapa (figura 8), se puede observar que frente a la costa del pacifico colombiano la probabilidad de presencia de la especie en una escala de 0 a 1 es

de 0.6%. Esto quiere decir que, si bien la especie está presente en el pacífico colombiano, su presencia no es muy elevada. El hecho que existan las condiciones adecuadas para que la especie pueda estar aquí y no lo esté, puede deberse a varios motivos, como competencia entre especies, accesibilidad o tolerancia a rangos fisiológicos. (López, 2007)

Tabla 1:
Valores AUC y variable ambiental que más contribuyó al modelo Maxent en el presente.

Especie	Training AUC	Test AUC	Contribución de las variables
M. novaeangliae	**0.976**	**0.938**	**Salinidad mínima**

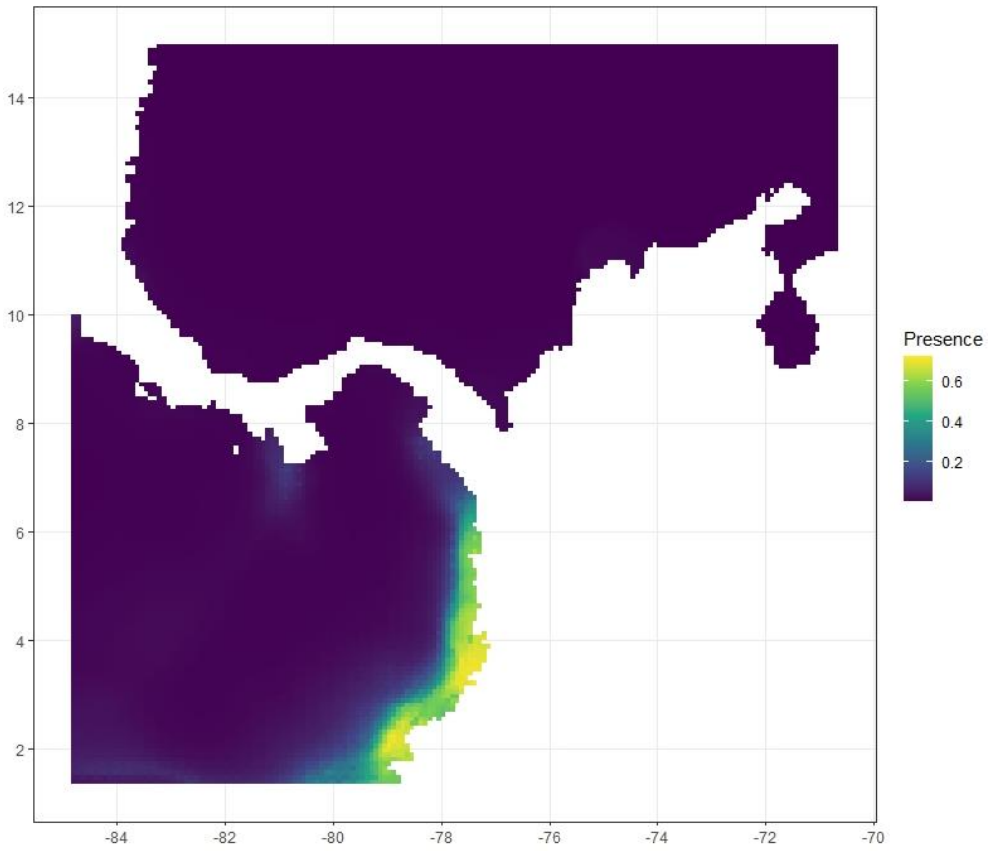

Figura No 8. Modelo de nicho actual de *M. novaeangliae* en el Pacífico Colombiano. La probabilidad de presencia frente a la costa pacífica es de 0.6%

Futuro RCP 4.5:

Es posible evidenciar que el valor de AUC arrojado para los datos de prueba en RCP 4.5 fue de 0.938 (Tabla 2) al estar bastante cercano a 1, quiere decir que el modelo tiene una buena confiabilidad. (Gutiérrez *et al*, 2018) En este caso, la variable que más contribuyó al modelo fue la de Salinidad Mínima. A pesar que el modelo se plantea en un escenario de aumento de temperatura, tiene sentido que la variable que más contribuya sea la salinidad mínima, ya que el aumento de temperatura eleva la tasa de evaporación lo que incrementa la salinidad del agua, sin embargo, la salinidad máxima adquiriría valores demasiado altos en los que la especie ya no podría encontrarse. En el escenario RCP4.5 es probable que la temperatura global aumente entre 2 y 3ºC para el 2100, siendo definido como un escenario intermedio, muchas especies no podrían adaptarse a los efectos de este escenario. En el mapa se puede observar que frente a la costa del pacifico colombiano la probabilidad de presencia de la especie en una escala de 0 a 1 es de 0.08%. Esto evidencia que el nicho cambió drásticamente y debido al aumento de la temperatura son muy pocas las jorobadas que llegan a la costa colombiana, se evidencia una probabilidad de presencia de 0,16% hacia la costa ecuatoriana. El cambio en el nicho ecológico viene de un proceso muy complejo. El calentamiento de las capas superiores del océano impulsa una mayor estratificación de la columna de agua, reduciendo la mezcla en algunas partes del océano y, en consecuencia, afectando la disponibilidad de nutrientes y la producción primaria. (Guldberg y Bruno, 2010) Esto provocaría que las ballenas coman mal, el comer mal significa no tener la energía suficiente para migrar y por lo tanto para aparearse o tener crías, por lo que se vería comprometida la supervivencia de la especie. (Viloria, 2022)

Tabla 2:

Valores AUC y variable ambiental que más contribuyó al modelo Maxent en el futuro con RCP 4.5

Especie	Training AUC	Test AUC	Contribución de las variables
M. novaeangliae	**0.976**	**0.938**	**Salinidad mínima**

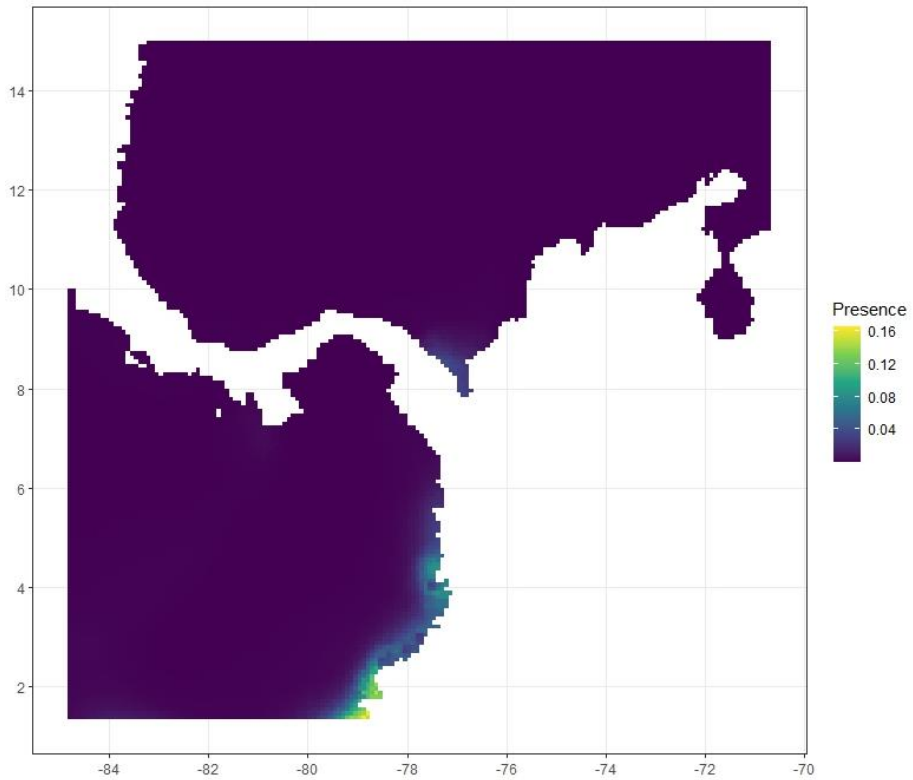

Figura No 9. Modelo de nicho RCP4.5 de *M. novaeangliae* en el Pacífico Colombiano. La probabilidad de presencia frente a la costa pacífica es de 0.08%

Futuro RCP 8.5:

En la tabla 3 se puede evidenciar que el valor de AUC arrojado para los datos de prueba fue de 0.928, siendo el máximo alcanzable de 1, lo que quiere decir que el modelo tiene una buena confiabilidad. (Gutiérrez *et al*, 2018) La variable que más contribuyó al modelo fue la de temperatura máxima y la que menos contribuyó fue la de temperatura Mínima. RCP8.5 es considerado como el peor escenario ambiental y el menos probable ya que las reacciones no se comprenden del todo. No obstante, el mapa (figura 10) evidencia que frente a la costa del

pacifico colombiano la probabilidad de presencia de la especie en una escala de 0 a 1 es de 0.2%, lo que quiere decir que aumentó levemente en comparación al escenario pasado. Aun así, la probabilidad de presencia es muy baja en contraste con el presente. De acuerdo con Abd-Elgawad y colaboradores (2019) el RCP 8.5 es un escenario de altas emisiones, donde la temperatura del océano aumentaría de 5 a 7 °C, la estratificación aumente en 12 a 30% y que el oxígeno disminuya en un 3.2% a 3.7%. Rasmussen (2007) plantea que independientemente de la distancia a las áreas de alimentación, existe una fuerza selectiva que impulsa a las ballenas jorobadas a migrar, por lo tanto, si las jorobadas no pueden llegar a las costas colombianas se debe por el hecho de tener una mala alimentación influenciado por el aumento de temperatura y como esto impacta las áreas de alimentación.

Tabla 3:

Valores AUC y variable ambiental que más contribuyó al modelo Maxent en el futuro con RCP 8.5

Especie	Training AUC	Test AUC	Contribución de las variables
M. novaeangliae	**0.980**	**0.928**	**Temperatura máxima**

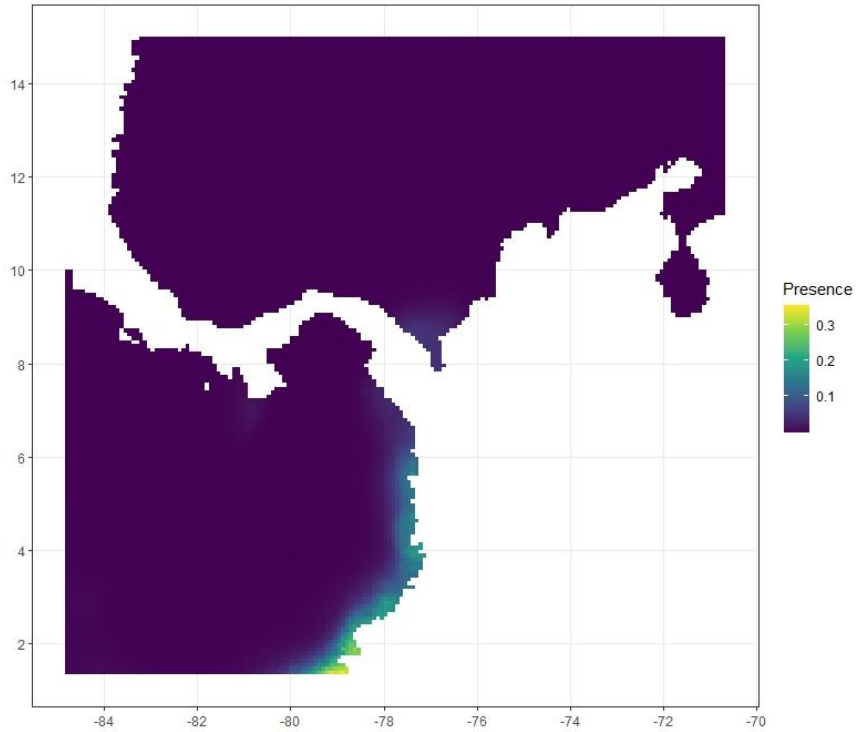

Figura No 10. Modelo de nicho RCP8.5 de *M. novaeangliae* en el Pacífico Colombiano. La probabilidad de presencia frente a la costa pacífica es de 0.2%

3. **Ruta de temperatura.**

Teniendo en cuenta los datos obtenidos en las temperaturas mínimas y máximas se realizó un promedio para determinar el rango de temperatura en el que la especie se encuentra. Se puede observar que *M. novaeangliae* se mueve en temperaturas de 25 a 28º C de Sur a Norte cuando llega a la costa pacífica de Colombia

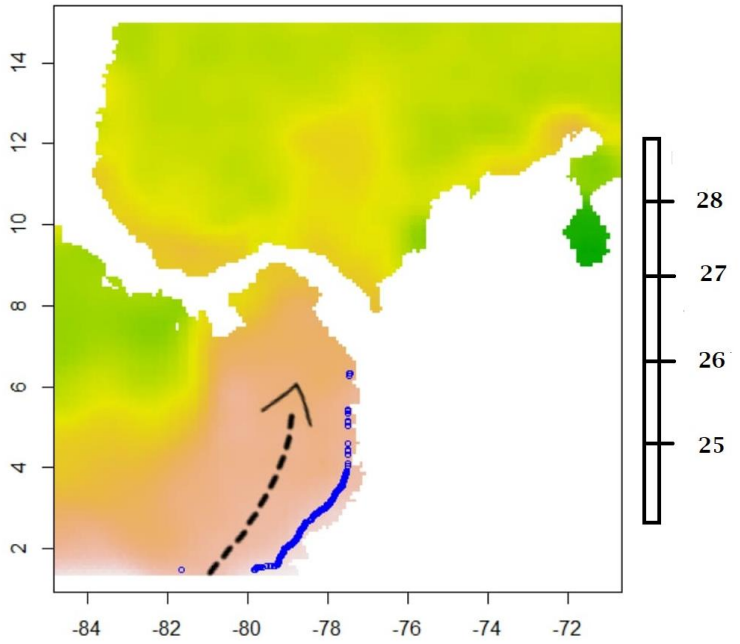

Figura No 11. Rango de temperatura en el que se mueve *Megaptera novaeangliae* determinado a partir del promedio de temperaturas mínimas y máximas.

Rasmussent y colaboradores (2007) realizaron un estudio de todas las áreas de reproducción del planeta dentro de los 30° del ecuador y las TSM climatológicas en todas las áreas fueron en un rango de 21.1 a 28.3 °C, con un promedio de 24.6 °C. De acuerdo con este estudio, el área frente a Ecuador y Colombia es la empleada para el apareamiento y el parto, por lo tanto, si las ballenas van más al norte sea posiblemente debido a la limitación de espacio u otro factor relacionado con la densidad. Por otro lado, Pacheco (2019) plantea que, frente a Perú, el hábitat más idóneo fue a los 22°C, mientras que Chávez (2018) en su estudio realizado en la costa pacífica colombiana, determina que la temperatura ideal es entre 24.5 y 26.5 °C, por lo que se puede inferir que las ballenas siguen una ruta de Sur a Norte, de temperaturas más bajas (22°C) a mas altas, llegando hasta los 28 °C.

Consideraciones finales

- Los rangos de preferencia de *M. novaeangliae* para temperatura oscila entre 26 a 29ºC, el de salinidad de 24 a 34 PSS y para clorofila de 0.2 a 3 mg.m3. De acuerdo con la literatura, los rangos fisiológicos para salinidad y clorofila están dentro de los valores normales, el de temperatura presenta valores ligeramente más elevados que los encontrados en estudios realizados en años pasados.
- En cuanto al escenario de cambio climático, se pudo establecer que efectivamente el aumento en la temperatura global incrementaría a su vez la temperatura del océano cambiando la distribución de las jorobadas. Sin embargo, el cambio en la distribución de la especie frente a la costa pacífica colombiana puede estar más relacionado a los efectos producidos por el aumento de la temperatura en su zona de alimentación.
- En el estudio se plantea una ruta de temperatura ascendente desde los 25º a 28ºC viajando desde el sur del continente hacia el norte, la cual cuenta con el soporte de estudios realizados al sur del continente donde la temperatura del agua es más baja.
- Si bien el escenario RCP 4.5 es catalogado como intermedio, fue posible evidenciar que las ballenas no serían capaces de adaptarse a la velocidad del cambio climático y que su probabilidad de presencia en las costas colombianas disminuiría considerablemente. En el escenario RCP 8.5, si bien la probabilidad aumenta a pesar de ser el peor escenario posible, las reacciones que llevarían a este no son muy claras y por lo tanto la confiabilidad se reduce.

Referencias bibliográficas

Ávila I. C., García C., Palacios D.M y Caballero S. 2013. *Mamíferos acuáticos de la región del Pacífico colombiano* En: 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

Balasubramanian A (2014) *Physical Oceanography.* Universidad de Mysore.

Bolaños J., Acevedo R., Bermúdez L., Boher-Bentti, S y Oviedo L (2015) *Ballena jorobada, Megaptera novaeangliae.* En: J.P. Rodríguez, A. García-Rawlins y F. Rojas-Suárez (eds.) Libro Rojo de la Fauna Venezolana. Cuarta edición.

Chávez P (2018) *Predicting cetacean habitat in the Colombian Pacific EEZ: challenges and recommendations* [Tesis para optar al título Master of Environmental Management] Duke University.

Clapham, P. J. (2009). Humpback whale Megaptera novaeangliae En: W. F. Perrin, B. Würsig, J. G. M. Thewissen (Eds). Encyclopedia of marine mammals (pp. 582-585). San Diego, USA: Academic Press.

Correia M. J (2019) Criterios confiables para la construcción del modelo de máxima entropía (Maxent) orientados a la pesquería con red de cerco en el pacífico oriental. Boletines de COFA.

Earth Observatory: NASA (2022) Chlorophyll. Tomado de:https://earthobservatory.nasa.gov/

Elgawad A *et al* (2019) Technical Summary, Final Draft. IPCC SR. Ocean and Cryosphere.

Estrada Y.Q., Luna R.A y Escalante T (2012) Patrones de distribución de los mamíferos en la Provincia de Oaxaca-Tehuacanense. Revista THERYA. Vol. 3(1) pp: 33-51.

Espinoza L., Gaxiola G., Robles J.M & Nájera S. (2001) *Temperatura, salinidad, nutrientes y clorofila a en aguas costeras de la ensenada del sur de California.* Ciencias Marinas Vol 27. (3). pp. 397-422

European Comission (2021) Map of the Week – Global Ocean Chlorophyll (monthly-mean). Maritime Forum. Tomado de: https://webgate.ec.europa.eu/maritimeforum

Fielding A & Bell J. (1997) *A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models.* Foundation for Environmental Conservation. Vol. 24 (1). pp. 39-49

Félix, F. & Guzmán, H.M. (2014). Satellite tracking and sighting data analyses of Southeast Pacific humpback whale (*Megaptera novaeangliae*): Is the migratory route coastal or oceanic? Aquatic Mammals 40:329–340.

García C., Comiso J., Berkelhammer M & Stock L. (2021) *Interrelationships of Sea Surface Salinity, Chlorophyll-a Concentration, and Sea Surface Temperature near the Antarctic Ice Edge.* Department of Earth and Environmental Sciences. Chicago, Illinois.

Guldberg O & Bruno J. (2010) *The impact of climate change on the World's Marine Ecosystems.* Science. Vol. 328

Gutiérrez O., Cámara R., Senciales J,M & García L (2018) *Modelos predictivos en Biogeografía: aplicación para la modelización de nichos ecológicos en Geografía Física.* Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, Vol. 78. pp: 88–126.

IWC (2007) Humpback Whale. International Whaling Commission.

Learmonth J.A, Macleod C.D, Santos M.B, Pierce G.J, Crick H y Robinson R.A Potential effects pf climate change on marine mammals. Oceanography and Marine Biology: An annual review. Vol 44. Pp: 431-464.

Lopéz M (2007) *Descripción y caracterización de nichos ecológicos: una visión más cuantitativa del espacio ambiental.* [Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Especialidad en Probabilidad y Estadística] Centro de Investigación en Matemáticas.

Mackintosh N. A (1965) The Stocks of Whales. Fishing News Books.

Marine Stewardship Council (2012) Climate change and fishing. Tomado de: https://www.msc.org/what-we-are-doing/oceans-at-risk/climate-change-and-fishing

Medrano L (2002) La ballena jorobada *(Megaptera novaeangliae)* en la Norma Oficial Mexicana 059-ECOL-1994, 2000 Ficha de la especie, categorización de riesgo y propuesta para un plan nacional de investigación y conservación. Universidad Autónoma de Baja California Sur. México.

Melo S.M., Reyes H y Lira A (2020) *Ecological niche models and species distribution models in marine environments: A literature review and spatial analysis of evidence. Ecological modelling.* Elsevier

Miller, G., 2007, Ciencia ambiental: Desarrollo sostenible, un enfoque integral, 8va edición, Editorial Internacional Thomson, México.

Morrone, J. J. 2001a. Sistemática, biogeografía, evolución; los patrones de la biodiversidad en tiempo y espacio. Las Prensas de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México

Moss R, Babiker M, Brinkman S, Calvo E, Carter T *et al* (2008) Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.

NASA (2022) Oceanography, Salinity. Retrieved [Enero 2023], from: https://science.nasa.gov/earth-science/oceanography/physical-ocean/salinity

Nieto M. D (2019) Guía Sobre la Vida de la Ballena Jorobada (Megaptera novaeangliae) y su paso por el Pacífico Colombiano. [Trabajo de grado para obtener el título de Administradora Ambiental y de los Recursos naturales] Universidad Santo Tomás. Colombia.

Odum, E. P., y G. W. Barret. 2008. Fundamentos de Ecología. Quinta edición. Thomson, Ciudad de México, México

Pacheco A.S (2019) Modelamiento del hábitat de la ballena jorobada *(Megaptera novaeangliae)* en el norte de Perú: variabilidad espacio temporal por tipo de grupo. [Tesis para optar al título de Licenciado en Biología] Universidad Ricardo Palma.

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.

Palacios D, M., Bograd S, J., Foley D.G & Schwing F.B (2006) *Oceanographic characteristics of biological hot spots in the North Pacific: A remote sensing perspective*.. Elsevier. Vol. 53. pp. 250-269.

Pearson R.G y Dawson T.P (2003) Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? Glob. Ecol. Biogeogr. Vol 12. pp: 361 371

Pérez A.A., García R., Ruiz J.A & Pérez A.L (2020) *Efecto del cambio climático a partir de los escenarios RCP 4.5 y 8.5 del año 2050.* Áreas Naturales Protegidas Scripta. Vol 6(1) pp. 53-74.

Prahl, H.Von, J.R. Cantera and R. Contreras (1990) Manglares y hombres en el Pacífico Colombiano. COLCIENCIAS. Bogotá, Colombia.

Rasmussen K., Palacios D., Calambokidis J., Saborio M., Dalla L., Secchi E., Steiger G., Allen J & Stone G. (2007) *Southern Hemisphere humpback whales wintering off Central America: insights from water temperature into the longest mammalian migration.* The Royal Society. Vol 3(3).

Rohling E, Yu J, Heslop D, Foster G, Opdyke B y Roberts A (2021) Sea level and deep-sea temperature reconstructions suggest quasi stable states and critical transitions over the past 40 million years. Science Advances Vol. 7.26.

Romero A (2022) Diversidad y Distribución. En A. Romero (Comp.), ILBMA. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.

SEMARNAT, (2018) *Programa de Acción para la Conservación de la Especie Ballena Jorobada (Megaptera novaeangliae)*, SEMARNAT/ CONANP, México

Soberón J., Osorio-Olvera L y Peterson T (2017) Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. Revista Mexicana de Biodiversidad

Slijper, E.J. (1962) Whales: the biology of cetaceans. Basic Books, New York.

Stern, S.J (2002) Migration and movement patterns. In Encyclopedia of Marine Mammals, W.F. Perrin et al. (eds). San Diego: Academic Press, 742–750

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.

Viloria L (09 diciembre de 2022) *Estrategias de alimentación en Misticetos/ Ecología trófica*. [Discurso principal] Diplomado Introducción a la Biología de Mamíferos Acuáticos.

Warren, D.L., Seifert, S.N., (2011) Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. Ecol. Appl. 21 (2), 335–342 2011.