



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas



Los impactos del cambio climático en la distribución de especies de focas en la Antártica.

Seminario de Título presentado a la
Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas
Para optar al título de Bióloga

Camila Alejandra Ugarte Romo

Concepción, enero de 2024

Este Seminario de Título ha sido desarrollado en el Departamento de Zoología, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción.



Prof. Guía

Dr. Enrique Rodríguez Serrano

Prof. Evaluadores

Dr. Fulgencio Lisón Gil

Dr. Cristián Hernández Ulloa

Prof. Coordinador Seminario de Título

Dr. Víctor Hernández Santander

Concepción, enero de 2024

AGRADECIMIENTOS

Hay una fila interminable de personas a las cuales me gustaría hacer mención por su apoyo incondicional en este largo proceso, pero hoy en particular quisiera agradecer en primer lugar a mi familia, por siempre confiar en mis capacidades y por darme apoyo en los malos y buenos momentos. A mi profesor guía por darme la oportunidad de entrar a este campo de investigación y por entregarme las herramientas necesarias. Y, por último, pero no menos importante, al profesor Reinaldo Rivera por acompañarme durante todo el proceso de investigación y por enseñarme paso por paso nuevos conocimientos.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	3
INDICE	4
INDICE DE FIGURAS	5
INDICE DE TABLAS	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	8
HIPÓTESIS	13
OBJETIVOS	13
METODOLOGÍA	14
RESULTADOS	17
DISCUSIÓN	27
CONCLUSIÓN	31
BIBLIOGRAFÍA	32

INDICE DE FIGURAS

figura 1: Valores de correlación entre variables ambientales seleccionadas.	17
Figura 2: Diversidad de krill en escenario RCP26.	17
Figura 3: Diversidad de krill en escenario RCP85.	18
Figura 4: Curvas de respuestas de <i>Leptonychotes weddellii</i> ante variables ambientales.	19
Figura 5: Curvas de respuestas de <i>Ommatophoca rossii</i> ante variables ambientales.	20
Figura 6: Modelos de idoneidad de nicho de <i>Leptonychotes weddellii</i> en: a) escenario presente binario b) escenario presente continuo c) escenario RCP26 continuo d) escenario RCP85 continuo.	22
Figura 7: Modelos de idoneidad de nicho de <i>Ommatophoca rossii</i> en: a) escenario presente binario b) escenario presente continuo c) escenario RCP26 continuo d) escenario RCP85 continuo.	23
Figura 8: Cambios en la distribución de <i>Leptonychotes weddellii</i> en el escenario RCP26.	24
Figura 9: Cambio en la distribución de <i>Leptonychotes weddellii</i> en el escenario RCP85.	24
Figura 10: Cambios en la distribución de <i>Ommatophoca rossii</i> en el escenario RCP26.	25
Figura 11: Cambios en la distribución de <i>Ommatophoca rossii</i> en el escenario RCP85.	26

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Selección de parámetros para la generación de modelos. AUC=área bajo la curva, Cbi= índice de boyce, AICc= índice de akaike.	18
Tabla 2. Porcentaje de importancia de variables ambientales <i>L. weddellii</i>	20
Tabla 3. Porcentaje de importancia de variables ambientales <i>O. rossii</i>	21
Tabla 4: Resumen del cambio de rango de <i>L. weddellii</i> en número de píxeles (resolución 0.083°).	25
Tabla 5: Resumen del cambio de rango de <i>O. rossii</i> en número de píxeles (resolución 0.083°)	26

RESUMEN

La Antártica es uno de varios paisajes que hoy en día están siendo afectados por el cambio climático, generando un impacto en el nicho ecológico de las especies presentes en este medio debido a la alteración geográfica y climática que resultan del cambio global. Sin embargo, este impacto no necesariamente es negativo para todas las especies. En la Antártica habitan seis especies de focas, tales como la Foca de Weddell, Foca Cangrejera, Foca de Ross, Foca Leopardo, Elefante Marino y Lobos Marinos que presentan bastantes similitudes morfológicas. No obstante, presentan diferencias claves en la reproducción, preferencias de hábitats y alimentación. Estos tres factores, son indiscutiblemente afectados por el cambio climático y potencialmente influyen en la distribución de estas especies. A pesar de ello, aún no sabemos si el cambio puede darse de manera favorable como desfavorables para las distintas especies. Debido a lo anterior, en la presente investigación se presenta un estudio sobre cómo los impactos del cambio climático afectan la distribución de *Leptonychotes weddellii* y *Ommatophoca rossii*, mediante un modelo de distribución de máxima entropía que predijo el hábitat idóneo de las especies en dos escenarios futuros que difieren en las concentraciones de los componentes atmosféricos radiactivamente activos, tales como los gases de invernadero. Para esto se definieron las variables ambientales marinas potencialmente asociados a la distribución de las especies y el hábitat idóneo presente de las especies mediante puntos de ocurrencia. Gracias a esto se obtuvo que, bajo los posibles cambios climáticos del futuro, la especie *L. weddellii* mostrará una reducción en el área en la que se distribuye, mientras que *O. rossii* experimentará una ampliación en su rango de distribución en el escenario climático más desfavorable. Esto implica que, en contextos de cambio climático, es probable que la distribución de *L. weddellii* se vea impactada negativamente, mientras que la distribución de *O. rossii* podría verse afectada favorablemente.

Palabras claves: Antártica, cambio global, distribución, *L. weddellii*, *O. rossii*.

ABSTRACT

Antarctica is one of several landscapes currently being affected by climate change, impacting the ecological niche of the species present in this environment due to the geographic and climatic alteration resulting from global change. However, this impact is not necessarily negative for all species. The Antarctic is home to six species of seals: the Weddell Seal, Crabeater Seal, Ross Seal, Leopard Seal, Elephant Seal, and Fur Seals, which have many morphological similarities. However, they have critical differences in reproduction, habitat preferences, and feeding. These three factors are indisputably affected by climate change and potentially influence the distribution of these species. However, we do not know whether the change may be favorable or unfavorable for the different species. Due to the above, the present research presents a study on how the impacts of climate change affect the distribution of *Leptonychotes weddellii* and *Ommatophoca rossii*, using a maximum entropy distribution model that predicted the suitable habitat of the species in two future scenarios that differ in the concentrations of radioactively active atmospheric components, such as greenhouse gases. For this purpose, the marine environmental variables potentially associated with the distribution of the species and the present suitable habitat of the species were defined using occurrence points. Thanks to this, it was obtained that, under possible future climate changes, the species *L. weddellii* will show a reduction in the area in which it is distributed. At the same time, *O. rossii* will experience an expansion in its distribution range in the most unfavorable climate scenario. This implies that, under climate change, the distribution of *L. weddellii* is likely to be negatively impacted, while the distribution of *O. rossii* could be favorably affected.

Key words: Antarctica, global change, distribution, *L. weddellii*, *O. rossii*.

INTRODUCCIÓN

En la literatura, ha tenido lugar una revisión exhaustiva de los conceptos relacionados con el nicho ecológico. El primero de estos conceptos fue propuesto por Grinnell (1917), quien lo definió como "la unidad de distribución más pequeña, dentro de la cual cada especie se mantiene debido a sus limitaciones instintivas y estructurales" (Mota *et al.*, 2019). En la actualidad, el concepto de nicho utilizado por la mayoría de los biólogos tiene sus raíces en la definición propuesta por GE Hutchinson en 1957, quien lo definió como la suma de todos los factores ambientales que actúan sobre un organismo. El nicho se representa como una región en un espacio multidimensional (Hutchinson, 1957). En otras palabras, un nicho ecológico se refiere al conjunto de características y variables ambientales que describen los recursos específicos que un organismo necesita para sobrevivir (López, 2007). Actualmente, existe un creciente interés en conocer y aplicar modelos de nichos ecológicos para resolver diversas cuestiones biológicas, lo que ha resultado en un aumento en el número de estudios que utilizan este enfoque (Mota *et al.*, 2019).

Los modelos de máxima entropía permiten predecir el hábitat adecuado donde se satisfacen los requisitos de nicho (Soberón y Nakamura, 2009). Estos modelos relacionan datos de distribución (presencia o abundancia en lugares conocidos) con información sobre las características ambientales y/o espaciales de aquellos paisajes en los cuales habitan las especies para la obtención de conocimientos ecológicos y evolutivos, como también para predecir la distribución de estas a futuro (Elith y Leathwick, 2009). Esta es una estrategia que se utiliza, entre otros tópicos, para predecir los impactos potenciales del cambio climático en la biodiversidad (Pearson y Dawson, 2003).

Justamente, la biodiversidad se encuentra amenazada por varios aspectos del cambio global inducidos por la especie humana, y muy especialmente por el cambio climático, ya que el clima es uno de los principales factores que regulan la distribución de las especies. En consecuencia, se estima que en el futuro será la principal causa de la extinción de las mismas (Russo y Kohlmann, 2013). Muchas variables ambientales influenciados por el cambio climático pueden acelerar la fragmentación del hábitat, que ha confinado a muchas especies a relictos de su distribución natural, provocando una marcada disminución de la variabilidad

genética y de la capacidad de migración y de adaptación al cambio (Russo y Kohlmann, 2013). En las últimas décadas se ha detectado una tendencia al incremento de las temperaturas globales en el planeta. Según las conclusiones del Panel Intergubernamental sobre cambio Climático (IPCC) de las Naciones Unidas, este incremento se puede cifrar en un aumento de 0.65°C en los últimos 50 años (Barbosa, 2011) y se pronostica que ocurrirá a un ritmo significativamente más rápido que los cambios observados en los últimos 10 mil años, de manera que la temperatura media superficial a nivel global aumente entre 1.4 y 5.8°C de 1990 al 2100 (Porrúa, 2001). Debido a este aumento de las temperaturas de manera acelerada el Planeta se está calentando, el hielo marino y los glaciares se están retirando y el nivel del mar está aumentando (Moore, 2008). Las causas de dichos cambios están abiertas a debate, pero la mayor parte del calentamiento observado en los últimos 50 años se ha debido a la influencia humana (*e. g.*, Hulme et al. 2002, EEA 2004). Ya sea el calentamiento de la atmósfera y el océano, en alteraciones en el ciclo global del agua, en reducciones de la cantidad de nieve y hielo, y en la elevación del nivel medio global del mar es altamente probable que la actividad de nuestra especie haya sido la causa dominante del calentamiento observado desde mediados del siglo XX (IPCC, 2014).

La Antártica es uno de los lugares del planeta donde más rápidamente están aumentando las temperaturas y, por tanto, donde se están produciendo notables cambios ambientales debidos al cambio climático. Este es un ambiente extremo que presenta variables ambientales únicas que se ven afectadas por el cambio climático y que al mismo tiempo condiciona la vida de especies endémicas adaptadas a él. La dinámica de los ecosistemas de la región está dominada por la Corriente Circumpolar Antártica (ACC) y sus sistemas frontales, la estacionalidad polar, y el avance y retroceso anual del hielo marino las cuales son susceptibles al calentamiento global (Constable *et al.*, 2003; Massom y Stammerjohn, 2010). En este período de tiempo, el continente antártico ha experimentado una de las más rápidas tendencias de aumento de la temperatura en la Tierra, en donde el calentamiento regional es especialmente pronunciado en la Península Antártica, demostrando un alza en la temperatura media anual de casi 3°C (Hansen *et al.*, 1999; Turner *et al.*, 2005, 2009). A la fecha, los cambios físicos más obvios incluyen el aumento de las temperaturas oceánicas, el desplazamiento hacia los polos de los frentes oceánicos y cambios regionalmente

contrastantes en la extensión y estacionalidad del hielo marino (Böning 2008; Bracegirdle *et al.*, 2008; Sokolov y Rintoul 2009; Turner *et al.*, 2009a, 2013; Stammerjohn *et al.*, 2012). Estos cambios han tenido, y seguirán teniendo profundas repercusiones en los ecosistemas marinos alrededor de la Antártica y en el Océano Austral, aunque los efectos pueden ser específicos de cada área antártica (Smetacek y Nicol, 2005; Boyd *et al.*, 2008; Nicol *et al.*, 2008; Massom y Stammerjohn, 2010).

La megafauna antártica comprende la mayoría de las especies depredadoras que respiran aire: aves y mamíferos marinos. Estas especies tienen una elevada longevidad y una reproducción lenta, y por ello son vulnerables a cambios climáticos que aumentan la variabilidad en la tasa de crecimiento de sus poblaciones. Estas especies pertenecen a los niveles superiores de las tramas tróficas regionales, y el krill antártico constituye el principal alimento de muchas de ellas (Forcada, 2011). El deshielo marino es una de las principales consecuencias del calentamiento global, afectado de manera tanto directa como indirecta a una gran diversidad de especies en la Antártica, debido a que toda su megafauna, en mayor o menor medida, depende del hielo para su descanso, cría y obtención de alimento (gracias a su dinámica e influencia en los procesos oceanográficos que favorecen la producción primaria) (Forcada, 2011). Por otro lado, otras especies menos dependientes del hielo posiblemente se beneficien de su reducción, con lo cual es razonable esperar alteraciones de las redes tróficas, de las comunidades de especies, de su distribución y de su abundancia (Forcada, 2011). Würsig *et al.* (2002) predijeron que las especies dependientes de parches limitados de tipos particulares de hábitat, como los pinnípedos terrestres o de hielo y los cetáceos costeros y de agua dulce, serán particularmente vulnerables al cambio climático, pudiendo verse afectados por marcados cambios en la distribución y en consecuencia en su persistencia.

Los pinnípedos son depredadores de alto nivel y juegan un papel importante en la dinámica depredador - presa del ecosistema antártico. El hielo marino proporciona una plataforma para que las focas antárticas puedan descansar, reproducirse y/o dar a luz, por lo tanto, es esencial para la supervivencia (Thea, 2015). Los pinnípedos junto con los cetáceos y los sirénidos son los únicos mamíferos adaptados a la vida acuática marina. Sin embargo,

la biología de los pinnípedos, como un clado perteneciente a Carnívora, refleja la necesidad de parir en tierra o hielo, aunque mucha de su actividad ocurra en el mar (Würsig, et al., 2018). Dentro de estas limitaciones, la distribución se ve afectada por factores físicos (*e.j.*, capa de hielo, ubicación de islas remotas), factores biológicos (*e.j.*, productividad, abundancia de depredadores y presas), factores demográficos (*e.j.*, tamaño de la población, edad, sexo y estado reproductivo), por limitaciones morfológicas y fisiológicas y acciones humanas (Würsig *et al.*, 2018). Los mamíferos marinos que tienen historias de vida que los vinculan a sitios específicos de reproducción, como la foca de Weddell (*Leptonychotes weddellii*), podrán verse gravemente afectados por los cambios en sus hábitats de alimentación y la migración de especies presa, asociada con una disminución en la extensión del hielo marino. Es por esta vulnerabilidad que nace el interés de estudiar a los representantes antárticos de la superfamilia Pinnipedia, grupo de mamíferos carnívoros con individuos de las familias Phocidae (focas verdaderas) en la Antártica.

La Foca de Weddell (*Leptonychotes weddellii*, Lesson, 1826) es el animal reproductor más austral del planeta y utilizan principalmente hábitats de hielo fijo y hielo a la deriva cercanos a la costa (Southwell *et al.*, 2012; Thea, 2015). Está adaptada a temperaturas extremas, y su éxito reproductor depende de las condiciones ambientales tales como la concentración del hielo (Forcada, 2011). Esta especie en el pasado fue intensamente explotada por su carne y actualmente se enfrenta a una disminución en los nacimientos y se espera a que desaparezca por su exposición al cambio climático ya que corren el riesgo de perder su hábitat de reproducción y alimentación (Forcada, 2011). En general, esta foca es en su no migratoria, es un animal grande y longevo, que ocupa un alto nivel trófico en la red alimenticia antártica (Bonnet, 1982; Laws, 1977). Por otro lado, la Foca de Ross (*Ommatophoca rossii* Gray, 1844) es el pinnípedo menos estudiado en la Antártica debido a la dificultad de acceso a su área de distribución que es más bien pelágica (Arcalis *et al.*, 2015; Blix y Nordøy, 2007). Sin embargo, regresan por pequeños periodos de tiempo a los bloques de hielo para la reproducción y muda (Wege *et al.*, 2021). Por lo anterior se cree que esta especie es menos susceptible al cambio climático ya que una reducción en la extensión del hielo marino en invierno puede resultar en aguas pelágicas abiertas que están más cerca de las áreas de hielo a la deriva utilizados por esta especie para reproducirse y mudar, lo que

reduce la distancia de nado a sus zonas de alimentación pelágica después de la reproducción y la muda (Wege *et al.*, 2021). Ambos pinnípedos, *Leptonychotes weddelli* y *Ommatophoca rossii*, se encuentran protegidas por la convención para la conservación de focas antárticas y se encuentran clasificadas en el grado de preocupación menor.

Debido a que los efectos de la pérdida de hielo marino estacional sobre los mamíferos marinos dependerán del grado en que una especie utilice el hielo para sus funciones vitales básicas, el deshielo será más perjudicial para aquellas especies que dependen en mayor medida de él, influyendo en la distribución de estas especies (Moore y Huntington, 2008; Würsig *et al.*, 2018). Si bien existen estudios que modelan la idoneidad de hábitat de *Leptonychotes weddelli* y *Ommatophoca rossii*, no hay ninguno que prediga la distribución a futuro como consecuencia del cambio climático. Esto último contribuiría a la definición de los impactos potenciales de este fenómeno en curso sobre las focas antárticas, y además, serviría para la toma de decisiones para la conservación de estas especies fundamentales dentro de las tramas tróficas antárticas (Wege *et al.*, 2021; LaRue *et al.*, 2019)

Por lo anterior, se estudiarán las consecuencias del cambio climático en estas especies a través de modelos de máxima entropía estimando la distribución potencial de las especies *Leptonychotes weddelli* y *Ommatophoca rossii*, en la actualidad y a futuro. Además, utilizando esos registros de ocurrencia, identificar los factores ambientales potencialmente asociados a la distribución del hábitat de estas mismas y predecir junto con comparar los cambios en la distribución de ambas especies como consecuencia del cambio climático.

HIPÓTESIS

Como consecuencia del cambio climático el deshielo ampliará el rango de distribución de *Ommatophoca rossii* debido al aumento de hábitat idóneo, mientras que disminuirá el rango de distribución de *Leptonychotes weddellii* debido a la pérdida de hábitat.

OBJETIVOS

- 1) Evaluar la distribución de hábitat idónea para *Leptonychotes weddellii* y *Ommatophoca rossii* utilizando registros de ocurrencia.
- 2) Identificar los factores ambientales potencialmente asociados a la distribución del hábitat de *Leptonychotes weddellii* y *Ommatophoca rossii*.
- 3) Predecir los cambios en la distribución de *Leptonychotes weddellii* y *Ommatophoca rossii* como consecuencia del cambio climático.
- 4) Comparar los cambios en la distribución de *Leptonychotes weddellii* y *Ommatophoca rossii* como consecuencia del cambio climático.

METODOLOGÍA

A. Área de estudio y datos de ocurrencia

El área de estudio fue determinada de acuerdo con la distribución de las especies, distribución principalmente circumpolar antártica. Se obtuvieron registros de ocurrencia de las especies que abarcan los años 1898 a 2023 recopilados de la base de datos GBIF (“GBIF”, <https://gbif.org>; recuperado en julio de 2023) y OBIS (“OBIS”, <https://obis.org/>; recuperado en septiembre de 2023). Se eliminaron los registros duplicados y para eliminar la autocorrelación se redujeron los datos de presencia de las especies en 9.2 km. Luego de este proceso obtuvimos un total de 288 registros de ocurrencias para *Ommatophoca rossii* y 1410 registros de ocurrencias para *Leptonychotes weddellii*.

B. Variables ambientales

Se obtuvieron 9 capas bioclimáticas actuales y futuras de la base de datos Bio-ORACLE, con una resolución espacial de 5 minutos de arco (~10 x 10 km.) las cuales son temperatura media, rango de temperatura, salinidad media, rango de salinidad, velocidad media de la corriente, rango de la velocidad de la corriente, espesor medio del hielo, rango de espesor de hielo y clorofila.

Se obtuvieron las variables climáticas futuras para el 2090-2100 utilizando dos escenarios contrastantes basados en las vías RCP26 y RCP85 definidos por la evolución en el tiempo de las emisiones o concentraciones de los componentes atmosféricos radiactivamente activos, tales como los gases de efecto invernadero (GEI) (Moss et al, 2010). El RCP26 es un escenario de pico y declive que termina en niveles muy bajos de concentración de gases de efecto invernadero para fines del siglo XXI, mientras que el RCP85 es un escenario de aumento de emisiones con el tiempo que conduce a altos niveles de concentración de gases de efecto invernadero.

Para eliminar las variables climáticas correlacionadas se utilizó el factor de inflación de la varianza (VIF) del paquete *usdm* (Naimi et al., 2014) en R (R Core Team, 2010). Se seleccionaron las variables no correlacionadas ($rs < 0.9$) y se utilizaron en los modelos finales.

Se realizó una capa adicional con la disponibilidad de presa de las especies estudiadas, para observar si la variable presa es importante o no frente al cambio climático, creando un mapa modelo para cada especie de krill antártico bajo escenarios actuales y futuros en la plataforma Maxent. Estos se sumaron en el sistema de información geográfica QGIS, creando un único mapa con la diversidad de presas disponibles bajo escenarios presentes y futuros (RCP26 y RCP85).

Se utilizaron en conjunto estas variables ambientales tanto abióticas como bióticas para modelar la distribución actual y futura de *Ommatophoca rossii* y *Leptonychotes weddellii*.

C. Modelo de nicho

El análisis de modelo de nicho se realizó en R (R Core Team, 2020). Para generar modelos de distribuciones geográficas actuales y futuras de las especies se utilizó el algoritmo de máxima entropía Maxent (Jueterbock et al., 2016), que es un método de aprendizaje automático que puede ajustar una variedad de funciones y patrones a los datos de ocurrencia conocidos. Maxent utiliza puntos de presencia (a partir de información incompleta) para estimar la probabilidad de que una especie esté presente al encontrar la distribución de máxima entropía basada en las condiciones ambientales repartidas por el área de estudio. La probabilidad de presencia, asociada a la idoneidad de hábitat, de una especie está representada por valores entre 0 y 1. Los modelos se generaron en el paquete *dismo* (Hijmans et al., 2023) a través del paquete *Wallace* (Kass et al., 2023). Se seleccionaron cinco FC (feature classes): lineal (L) cuadrática (Q), bisagra (H), producto (P) y característica de umbral (T). Estas nos entregan la forma que van a obtener las respuestas de las variables ambientales, muestran la flexibilidad de la respuesta modelada. Para optimizar el modelo MaxEnt, el multiplicador de regularización (RM) se estableció en 1 ~ 6. Los modelos se establecieron con 5000 puntos de fondo y una partición espacial de Block ($k = 4$). Los modelos finales se eligieron de acuerdo con el delta en el criterio de información de Akaike corregido (AICc), este ofrece un valor objetivo que cuantifica simultáneamente la precisión y la simplicidad del modelo (Anderson y Burnham, 2004). Se seleccionaron aquellos modelos con ≤ 2 AICc del modelo más parsimonioso ($\Delta AICc = 0$; Anderson y Burnham, 2004).

Para evaluar el rendimiento de la predicción, se utilizaron dos índices, el área bajo la curva de la característica operativa del receptor (AUC ROC) (Hanley y McNeil, 1982) y el índice de Boyce. La precisión de la predicción es similar a la aleatoria para valores de AUC inferiores a 0,5, pobre para valores en el rango de 0,5 a 0,7, aceptable en el rango de 0,7 a 0,9 y valores superiores a 0,9 se consideran excelentes (Swets, 1988). El índice de Boyce solo requiere presencias y mide cuánto difieren las predicciones del modelo de la distribución aleatoria de las presencias observadas a lo largo de los gradientes de predicción es continuo y varía entre -1 y +1 (Boyce et al., 2002). Los valores positivos indican un modelo cuyas predicciones actuales son consistentes con la distribución de presencias en el conjunto de datos de evaluación, los valores cercanos a cero significan que el modelo no es diferente de un modelo aleatorio, los valores negativos indican predicciones contrarias, es decir, la predicción de áreas de mala calidad donde las presencias son más frecuentes (Hirzel et al., 2006). Los cálculos se implementaron en el paquete *ecospat* (Broennimann et al., 2023) en R (R Core Team, 2020). Luego de seleccionar el mejor modelo, se utilizó la transformada “cloglog” para generar el mapa de distribución, que deriva de la interpretación de Maxent como un proceso de Poisson no homogéneo (IPP). Esta transformación presenta una justificación teórica más fuerte que la transformada logística a la que reemplaza por defecto (Phillips et al., 2017).

Una vez seleccionado el mejor modelo se implementó en Maxent para predecir la idoneidad del hábitat de las especies en la distribución potencial bajo el clima actual y las proyecciones futuras. Para cuantificar los cambios en la distribución geográfica en escenarios climáticos futuros, se compararon los modelos actuales con los modelos proyectados para el

futuro. Primero, se aplicó el umbral de presencia de entrenamiento del percentil 10 para convertir la predicción continua en predicción binaria (presencia/ausencia), esta es la más estricta de las dos reglas de umbral actualmente disponibles en el paquete *Wallace* (Kass *et al.*, 2023). Se calculó las áreas de rango de expansión, rango de contracción y la distribución sin cambio entre modelos presentes y futuros en el paquete *biomod2* (Thuiller *et al.*, 2023) en R y se visualizó en el software QGIS (QGIS Development Team, 2023). El programa entregó un resumen del cambio de rango para cada comparación que contiene los siguientes valores: **Loss**: número de píxeles que se prevé que se perderán, **Stable0**: número de píxeles no ocupados actualmente y que no se prevé que estén, **Stable1**: número de píxeles actualmente ocupados y que se prevé que permanecerán ocupados, **Gain**: número de píxeles que se prevé que se ganarán, **PercLoss**: porcentaje de píxeles actualmente ocupados y que se prevé que se perderán, **PercGain**: porcentaje de píxeles que se prevé ganar en comparación con el número de píxeles ocupados actualmente, **SpeciesRangeChange**: porcentaje de píxeles que se prevé que cambiarán (pérdida o ganancia) en comparación con el número de píxeles ocupados actualmente, **CurrentRangeSize**: número de píxeles ocupados actualmente, **FutureRangeSize0Disp**: número de píxeles que se prevé que estarán ocupados, suponiendo que no haya migración y **FutureRangeSize1Disp**: número de píxeles que se prevé que estarán ocupados, suponiendo migración.

RESULTADOS

1. Variables seleccionadas

Las variables ambientales con valores de correlación menores a 0.9 fueron seleccionadas para el estudio mediante aproximación VIF. Estas variables fueron clorofila, rango de la velocidad de la corriente, rango del espesor de hielo, salinidad media, rango de salinidad y rango de la temperatura (figura 1).

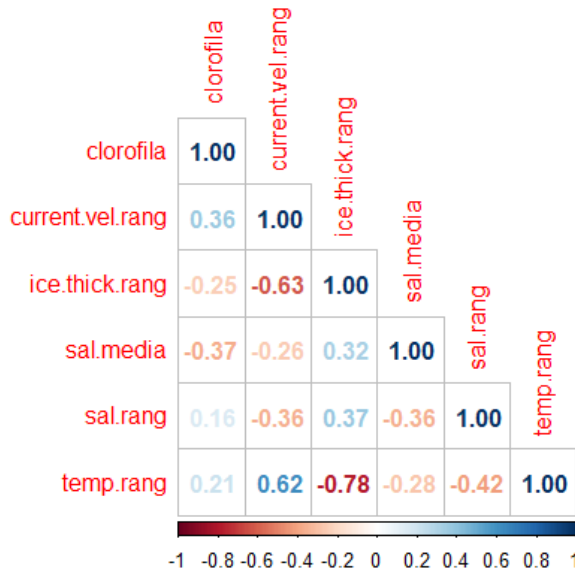


Figura 1: Valores de correlación entre variables ambientales seleccionadas.

2. Capa de disponibilidad de presas

Adicionalmente se agregó la capa de diversidad de krill, esta se construyó tomando 3400 ocurrencias de krill, generando un modelo predictivo mediante Maxent para estimar la probabilidad de ocurrencia de esta especie. Esta capa se utilizó como una variable biótica que describe la disponibilidad de alimento de las especies estudiadas (figura 2 y 3).

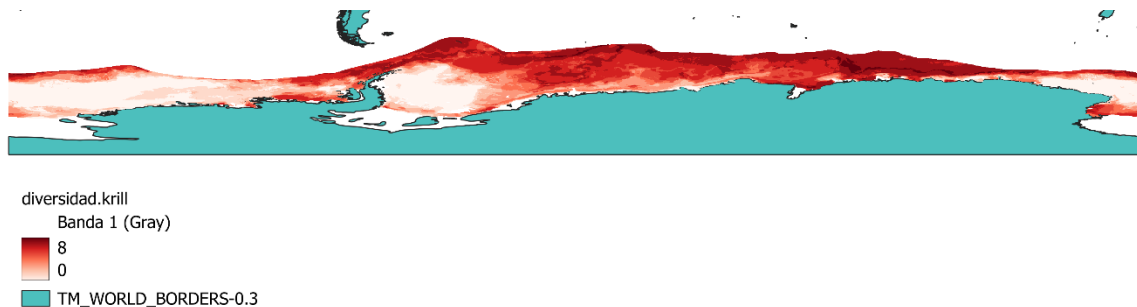


Figura 2: Diversidad de krill en escenario RCP26.

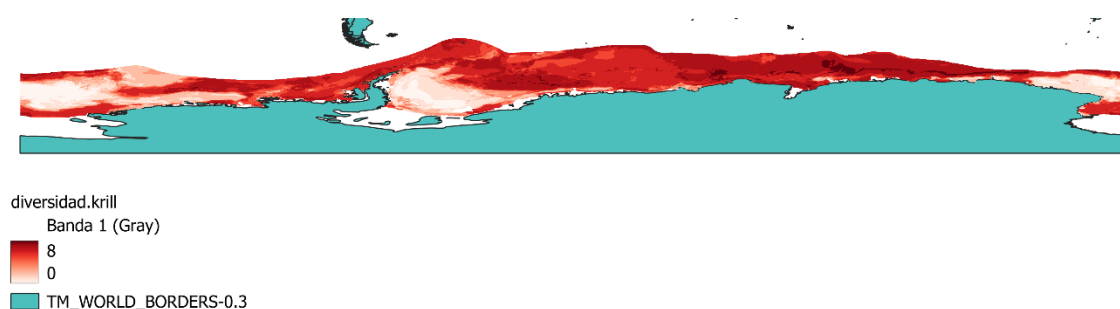


Figura 3: Diversidad de krill en escenario RCP85.

3. Modelo seleccionado

En los modelos de ambas especies se seleccionó el que presentaba una mejor combinación de ajuste y simplicidad, es decir, el que presentaba un delta de Akaike igual a cero. En el caso de la foca de Weddell y la foca de Ross fueron el modelo Fc.LQHP_rm.1 y Fc.LQH_rm.3 respectivamente (tabla 1). El modelo de *L. weddellii* presenta rasgos lineales, cuadráticos, bisagra y producto, junto con un parámetro de regularización de 1, mientras que el modelo de *O. rossii* presenta rasgos lineales, cuadráticos y bisagra, junto con un parámetro de regularización de 3. Detalles de la composición de los modelos y la relación con las ocurrencias se entregan en las secciones siguientes.

Tabla 1. Selección de parámetros para la generación de modelos. AUC=área bajo la curva, Cbi= índice de boyce, AICc= índice de akaike.

Especie	tune.args	auc.train	cbi.train	AICc	Delta.AICc
<i>L. weddellii</i>	fc.LQHP_rm.1	0.89840631	0.994	34767.0816	0
<i>O. rossii</i>	fc.LQH_rm.3	0.870956338	0.975	6984.294279	0

Ambos presentan un AUC entre 0,7 y 0.9 por lo que es un modelo con buen ajuste. Por otro lado, ambos presentan un valor de Índice de Boyce cercanos al +1, lo que indica un modelo con alta capacidad predictiva.

4. Curvas de respuestas

En general una curva de respuesta es una representación gráfica de la relación entre una variable independiente y una variable dependiente. En este estudio las variables independientes son las variantes ambientales que condicionan la presencia de una especie, es decir, la variable dependiente.

Con respecto a las curvas de respuestas, se observa lo siguiente en la especie *Leptonychotes weddellii* (figura 4).

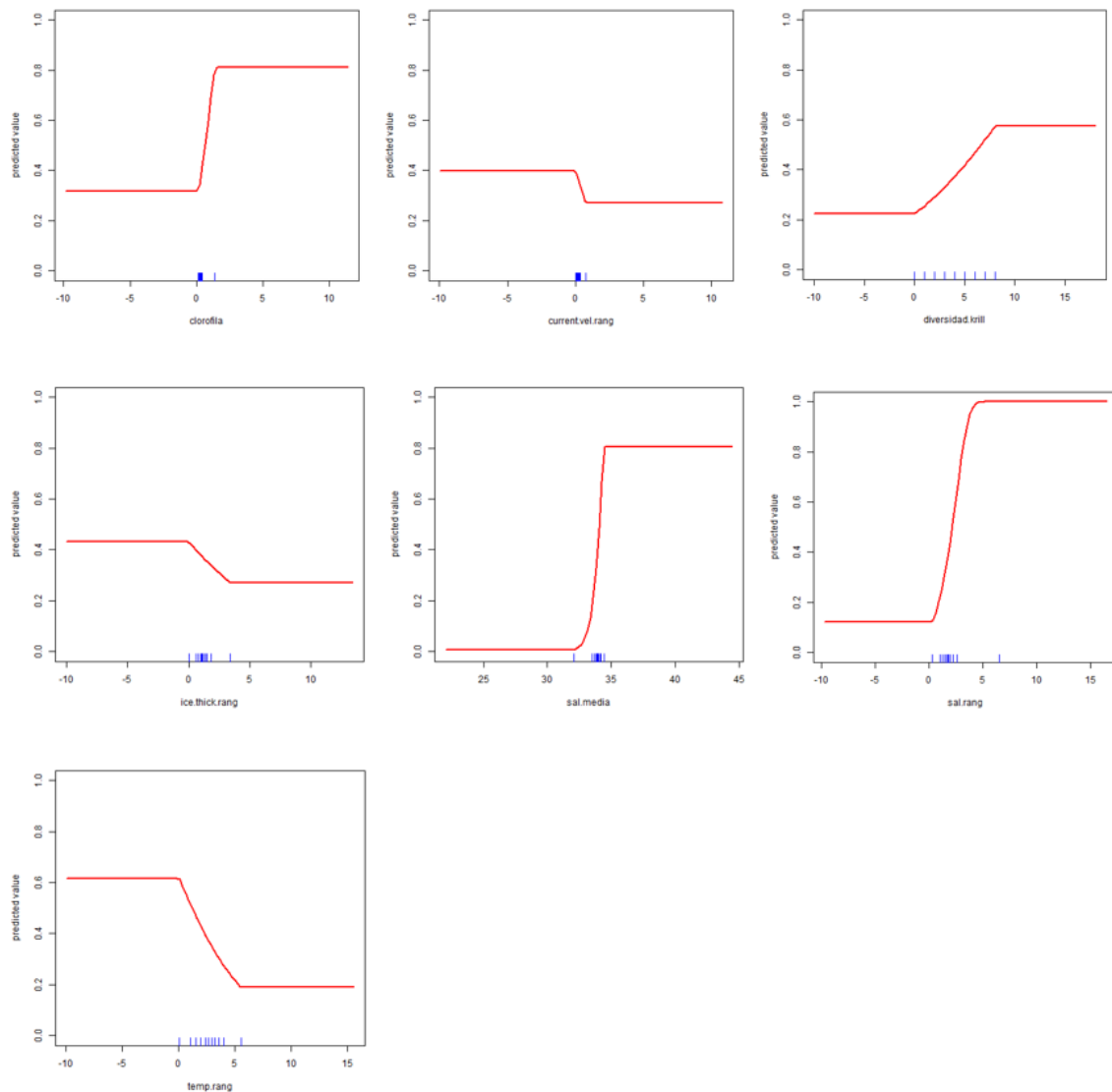


Figura 4: Curvas de respuestas de *Leptonychotes weddellii* ante variables ambientales.

Como interpretación de las curvas de respuestas de la presencia de la especie *L. weddellii* en función a las variables ambientales se puede decir que:

- Cuando hay mayor productividad en el ambiente, aumenta la probabilidad de presencia de la especie.
- A mayor velocidad de la corriente, menor probabilidad de presencia de la especie.
- Aumenta la probabilidad de presencia de la especie a medida que aumenta la diversidad de krill.
- Al aumentar el grosor del hielo, disminuye la probabilidad de presencia de la especie.
- A medida que aumenta la salinidad o la variabilidad de la salinidad, aumenta la probabilidad de presencia de la especie.
- A medida que aumenta la temperatura disminuye la probabilidad de presencia de la especie.

A continuación, mostramos el porcentaje de importancia de las variables ambientales

Tabla 2. Porcentaje de importancia de variables ambientales *L. weddellii*

Variable ambiental	Porcentaje
Clorofila	15.2596
Velocidad de la corriente	0.2983
Diversidad de krill	9.2972
Espesor del hielo	4.1397
Rango de salinidad	50.2999
Salinidad media	17.6065
Rango de temperatura	3.0987

Por otro lado, se puede observar lo siguiente en la especie *Ommatophoca rossii* (figura 5)

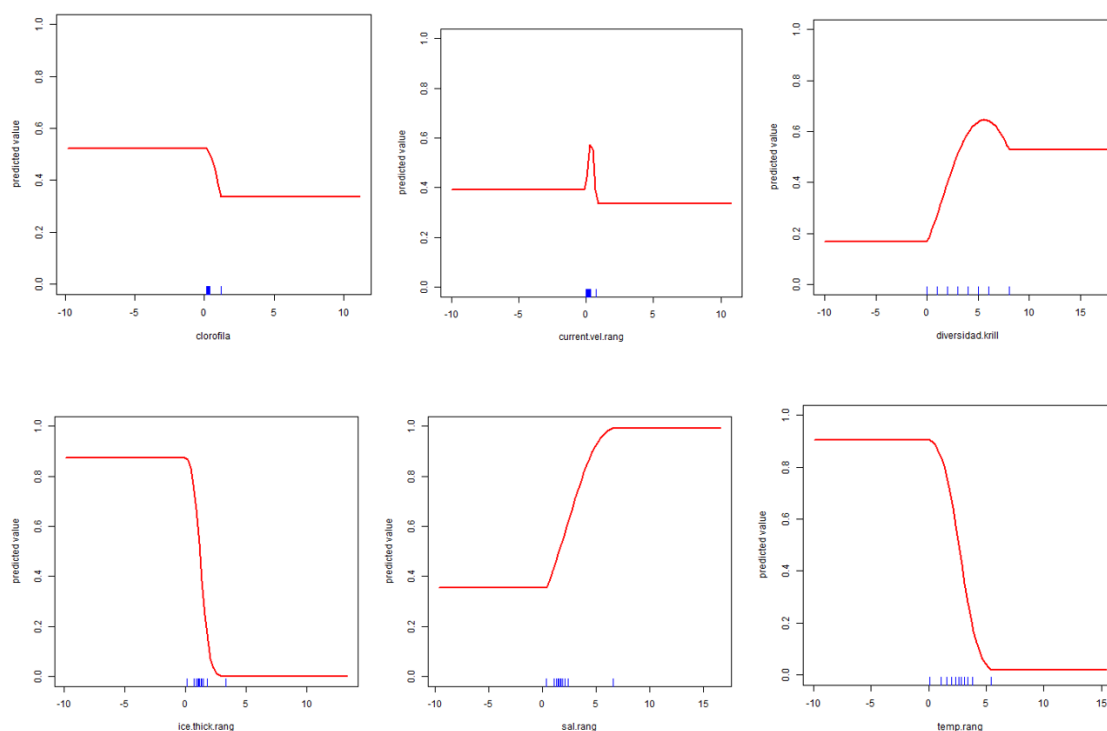


Figura 5: Curvas de respuestas de *Ommatophoca rossii* ante variables ambientales.

Como interpretación de las curvas de respuestas de la presencia de la especie *O. rossii* en función a las variables ambientales se puede decir que:

- A valores bajos de clorofila es mayor la presencia de la especie.
- Cuando la velocidad de la corriente es cero hay mayor probabilidad de presencia de la especie.
- Cuando aumenta la diversidad de Krill aumenta la probabilidad de presencia de la especie.

- d) A valores intermedios a altos del grosor del hielo disminuye la probabilidad de presencia de la especie.
- e) Cuando hay mayor variabilidad de salinidad en las aguas, aumenta la probabilidad de presencia de la especie.
- f) Al aumentar la temperatura disminuye la probabilidad de presencia de la especie, es decir, no sienten afección por las aguas cálidas.

A continuación, mostramos el porcentaje de importancia de las variables ambientales

Tabla 3. Porcentaje de importancia de variables ambientales *O. rossii*

Variable ambiental	Porcentaje
Clorofila	28.2427
Velocidad de la corriente	0.6121
Diversidad de krill	20.7039
Espesor del hielo	13.7001
Rango de salinidad	15.4205
Salinidad media	12.4378
Rango de temperatura	8.8828

5. Modelos de idoneidad de nicho

Una vez seleccionado el mejor modelo en cada una de las especies se realizó la proyección de idoneidad de nicho bajo escenarios presentes y futuros (figura 6 y 7).

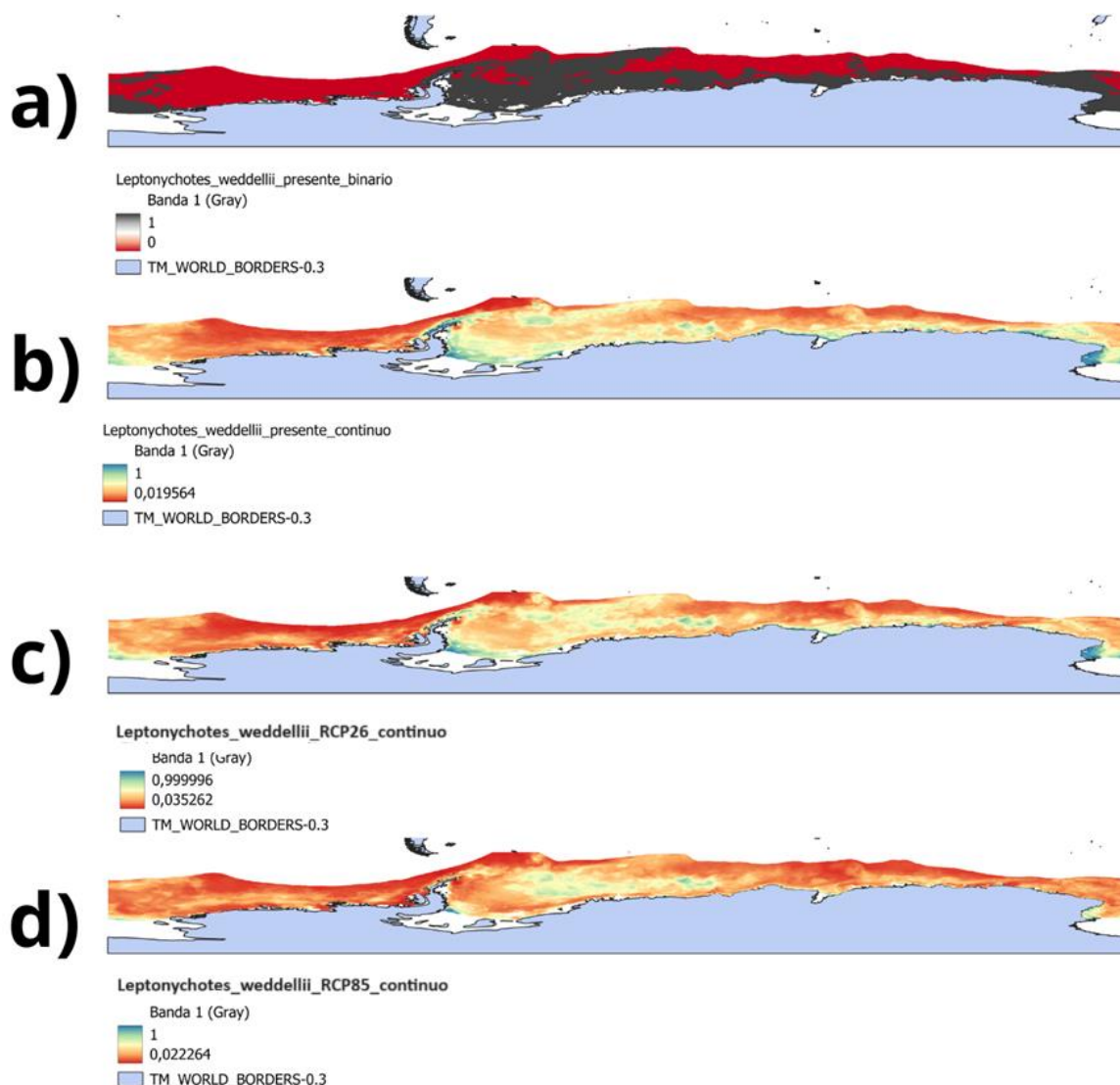


Figura 6: Modelos de idoneidad de nicho de *Leptonychotes weddellii* en: a) escenario presente binario b) escenario presente continuo c) escenario RCP26 continuo d) escenario RCP85 continuo.

En el caso del modelamiento del escenario presente Maxent predijo que la distribución del hábitat potencialmente adecuado para *L. weddellii* es principalmente circumpolar antártica, con una concentración mayor en la Península Antártica, el Mar de Weddell, Mar de Lasarev y Mar de Ross. Sin embargo, se visualiza como poco a poco

aumentan las áreas con coloración roja, es decir, con ausencia de la especie, a través del tiempo en los escenarios del cambio climático, presentando una mayor ausencia el escenario RCP85 con una concentración de la especie entre el Mar de Weddell y el Mar de Lasarev (con mucha menos concentración), manteniéndose en el lado oriental de la Antártica y perdiendo gran parte de la concentración en la Península Antártica, en el Mar de Ross (lado occidental).

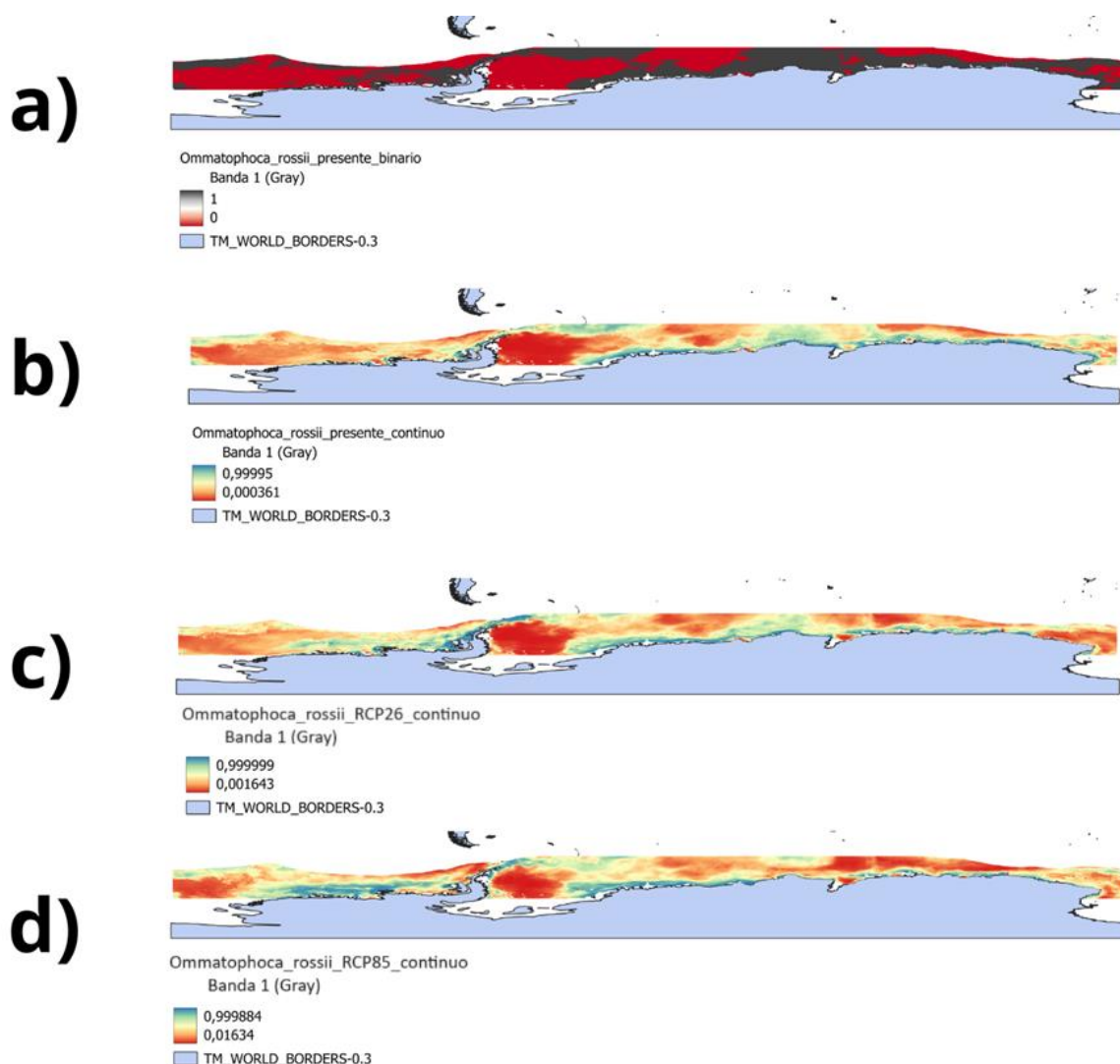


Figura 7: Modelos de idoneidad de nicho de *Ommatophoca rossii* en: a) escenario presente binario b) escenario presente continuo c) escenario RCP26 continuo d) escenario RCP85 continuo.

En el caso del modelamiento del escenario presente Maxent predijo que la distribución del hábitat potencialmente adecuado para *O. rossii* es principalmente circumpolar antártica, con una concentración mayor entre los mares de Lasarev y Cosmonautas. Se puede observar como a través del tiempo en los distintos escenarios del cambio climático, la distribución de

la especie se extiende hacia la Antártica Occidental, específicamente en el Mar de Amundsen y la Península Antártica, pero sobre todo en el escenario más maligno (RCP85).

6. Cambios en la distribución

Para responder a la pregunta de investigación, se realizó un cálculo del área de extensión, área de contracción y área sin cambio a través del tiempo para ambas especies (figura 8, 9, 10 y 11) junto con sus resultados de los análisis de las diferencias de tamaño de rango entre las proyecciones de los modelos de distribución de especies (tabla 2, 3, 4 y 5). Estas funciones permiten calcular el número absoluto de ubicaciones (píxeles) perdidas, estables y ganadas.

En las siguientes imágenes (figura 8, 9, 10 y 11) el área perdida es el área de contracción, el ocupado corresponde al área de no cambio en la distribución de las especies, la región desocupada corresponde a el área que nunca ha sido ocupada por las especies y la ganada corresponde a el área de expansión.

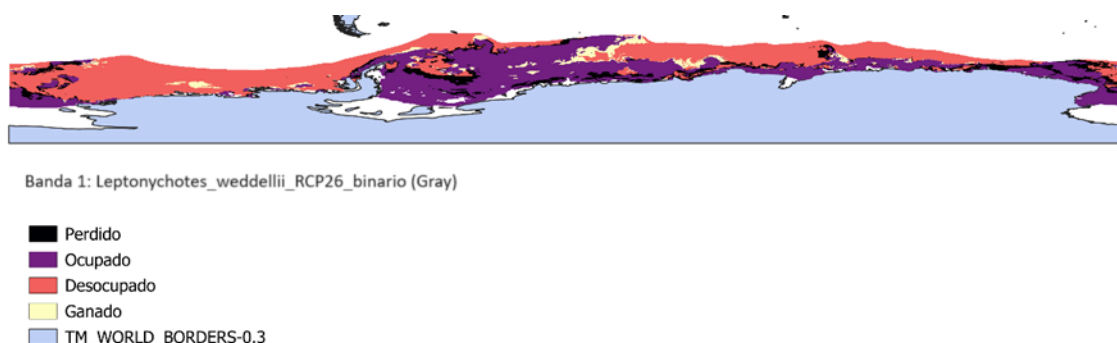


Figura 8: Cambios en la distribución de *Leptonychotes weddellii* en el escenario RCP26.

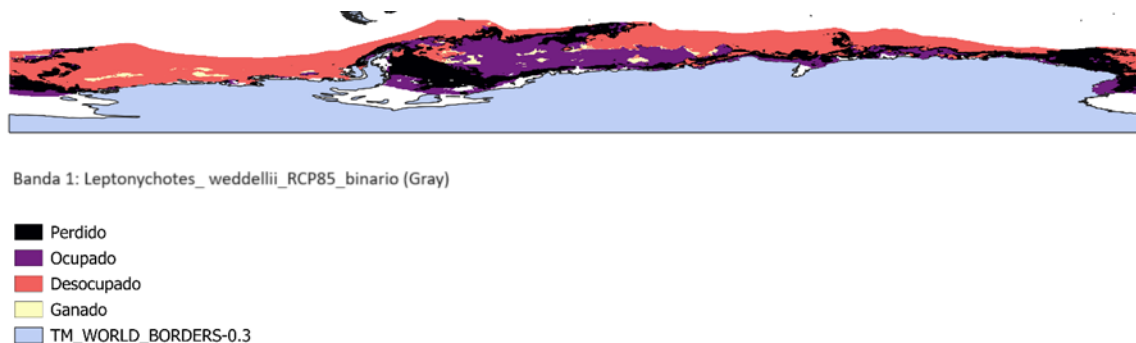


Figura 9: Cambio en la distribución de *Leptonychotes weddellii* en el escenario RCP85.

A simple vista se puede observar que en el escenario RCP85 hubo una mayor pérdida de área anteriormente ocupada y que en el escenario RCP26 hubo una mayor ganancia de área anteriormente no ocupada por la especie. Se pueden observar mayores detalles de los cambios en la distribución de la especie en la siguiente tabla (tabla 2):

Tabla 4. Resumen del cambio de rango de *L. weddelli* en número de píxeles (resolución 0.083°)

	RCP26	RCP85
Loss	55233	154687
Stable0	267452	280213
Stable1	221078	121624
Gain	25205	12444
PercLoss	19.989%	55.983%
PercGain	9.122%	4.504%
SpeciesRangeChange	-10.867%	-51.479%
CurrentRangeSize	276311	276311
FutureRangeSize.NoDisp	221078	121624
FutureRangeSize.FullDisp	246283	13406

Se puede verificar que en el escenario RCP85 hay una mayor pérdida de píxeles y que en el escenario RCP26 hay una mayor ganancia de píxeles. Es importante destacar que en ambas situaciones el área de cambio (ya sea de ganancia o pérdida) corresponde a un porcentaje negativo, esto quiere decir que en general hubo una mayor pérdida del área ocupada por *L. weddellii*, presentando una mayor pérdida de píxeles en el escenario RCP85.

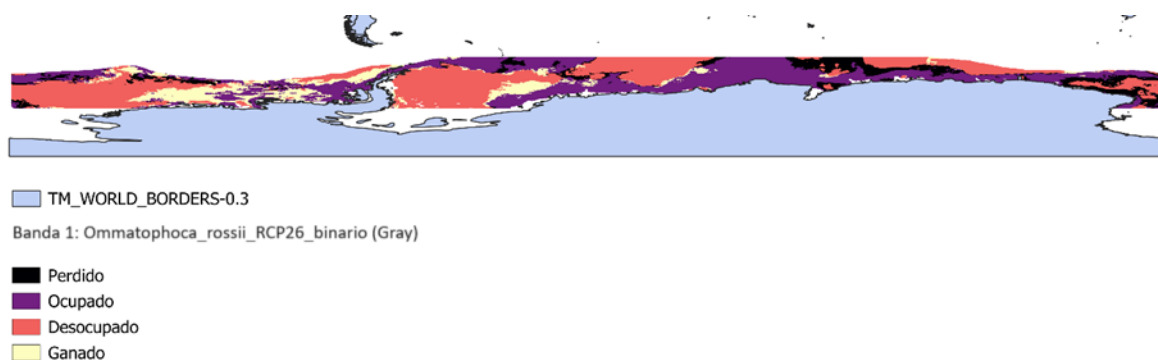


Figura 10: Cambios en la distribución de *Ommatophoca rossii* en el escenario RCP26.

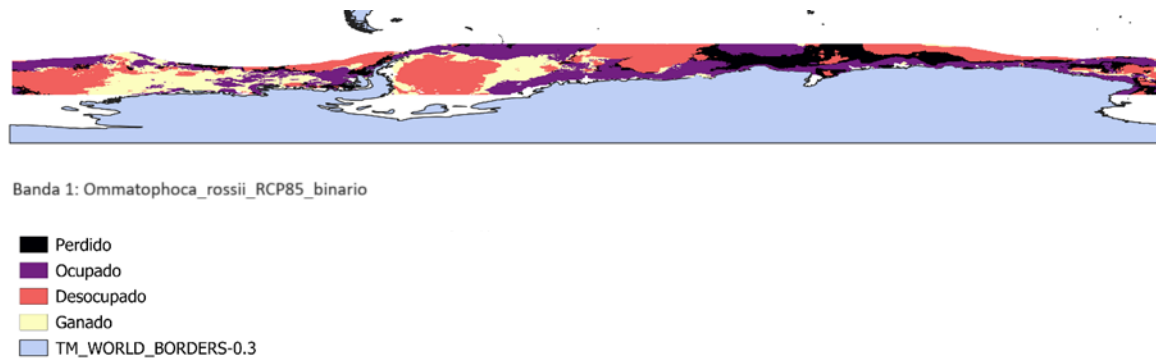


Figura 11: Cambios en la distribución de *Ommatophoca rossii* en el escenario RCP85.

A simple vista se puede observar que en el escenario RCP26 hay una cantidad similar en la pérdida y ganancia de píxeles, mientras que en el escenario RCP85 se aprecia una mayor área de expansión, superando los píxeles de pérdida.

Tabla 5. Resumen del cambio de rango de *O. rossii* en número de píxeles (resolución 0.083°)

	RCP26	RCP85
Loss	57034	71306
Stable0	199713	163969
Stable1	170728	156456
Gain	55416	91160
PercLoss	25.041%	31.307%
PercGain	24.331%	40.024%
SpeciesRangeChange	-0.71%	8.717%
CurrentRangeSize	227762	227762
FutureRangeSize.NoDisp	170728	156456
FutureRangeSize.FullDisp	226144	247616

Se puede verificar que efectivamente en el escenario RCP26 hay una pequeña diferencia (de casi 1%) entre el área perdida y el área ganada en la distribución de la especie, con tan solo un 0.71% (con valor negativo) de cambio total en el área de estudio, mientras que en el escenario RCP85 hay una mayor cantidad de píxeles ganados que perdidos y con aproximadamente un 9% de área de cambio en general con valor positivo, es decir, hubo una mayor extensión en la distribución de la especie que una contracción.

DISCUSIÓN

Nuestros resultados señalan que, *L. weddellii* y *O. rossii* presentan una distribución actual circumpolar. Sin embargo, las proyecciones de los modelos a escenarios futuros indican que, la distribución de *L. weddellii* reducirá su rango de distribución y *O. rossii* mantendrá en gran medida su rango geográfico, existiendo pocas localidades en donde esta especie ampliará su rango de distribución desde el presente al año 2100. Interesantemente, dentro de las variables ambientales estudiadas el mismo conjunto (*i.e.*, krill, espesor del hielo, el rango de salinidad y la temperatura), contribuyen de manera similar para predecir las distribuciones de ambas especies a pesar de sus diferencias ecológicas aparentes.

En ambos modelos de hábitat futuro (escenario RCP26 Y RCP85) la distribución *L. weddellii* se centró en el lado oriental de la Antártica, zona que se ha calentado ligeramente en comparación con otras áreas (Morande, 2017). Es más, en el escenario benigno se puede observar que el área de expansión del rango se concentra en esta zona en particular (véase Fig. 8). Mientras que en el caso de *O. rossii* podemos ver como el área de expansión del rango se centró en el lado occidental de la Antártica (véase Fig. 10 y 11), zona donde se ha perdido significativamente capas de hielo debido a las alzas en la temperatura (Morande, 2017). Al contrario, podemos observar que el número de píxeles perdidos para el caso de *L. weddellii*, no solamente es mayor (en el peor de los escenarios) que el número de píxeles perdidos para *O. rossii*, sino que también se contrae en el mismo mar en el cual se mantendrá la especie, el Mar de Weddell, esto debido a que no todas las regiones de la Antártida están experimentando cambios climáticos de la misma manera ni al mismo ritmo (Chown y Brooks, 2019). Si bien el Mar de Weddell es una de las áreas menos afectadas por el cambio climático en el Océano Austral si existe un fuerte calentamiento y agotamiento de la capa de hielo marino en el mar de Weddell occidental (Conil *et al.*, 2006; Wege *et al.*, 2021).

Para ambas especies existe mayor idoneidad de hábitat al aumentar la diversidad del krill antártico, debido a que el krill muestra una estructura espacial asociada con características físicas de meso escala (*i.e.*, decenas a cientos de kilómetros; Brinton, 1985; Watkins *et al.*, 1986; Murphy *et al.*, 1988; Witek *et al.*, 1988; Miller y Hampton, 1989; Watkins y Murray, 1998). Esta distribución irregular en una variación de escalas permite que una variedad de especies de depredadores con estrategias de alimentación muy diferentes explote el krill antártico (Murphy *et al.*, 1988) y consecuentemente existan mayor disponibilidad de alimento para *L. weddellii* y *O. rossii* en las zonas donde aumenta la diversidad del krill antártico. En relación con esto, la ecología del krill es fundamental para explicar la distribución de *L. weddellii* y *O. rossii*. Al respecto, durante su estado larvario, el krill está asociado al hielo antártico y algas de las cuales utiliza para alimentarse y refugiarse frente a depredadores (Smetacek y Nicol 2005). Debido a esta dependencia del hielo, probablemente el krill sea uno de los grupos más afectados por las consecuencias del calentamiento global (Forcada, 2007). Este cambio también repercute, indirectamente, sobre los principales depredadores del krill tales como los pinnípedos (Forcada, 2007). Por otro lado, la salinidad influye en la distribución geográfica y abundancia del krill antártico (Gutiérrez *et al.*, 2006;

Meza *et al.*, 2021) y hoy existe una tendencia hacia la desalinización del mar Antártico debido al deshielo, lo que podría estar afectando al desarrollo de estos eufásidos. Es más, el deshielo sostenido en el tiempo significa un menor desarrollo de las algas que necesitan para alimentarse (Vásquez, 2016). Es importante destacar que como el krill tiene su propia dinámica de respuesta al cambio climático uno de los factores que influirían en la distribución de las focas antárticas dependerá en última instancia de cómo respondan sus presas a los efectos climáticos regionales y de su propia plasticidad de comportamiento (Wege *et al.*, 2021).

Con respecto al espesor del hielo ambas especies presentan menor probabilidad de presencia al aumentar el grosor del hielo. Esto puede explicarse debido a que la foca de Weddell se sitúa preferentemente en zonas de hielo de poco espesor y a lo largo de las costas, especialmente zonas donde la costa está protegida de los fuertes vientos o corrientes, por lo que disminuye su probabilidad de presencia al aumentar la velocidad de las corrientes y al aumentar el grosor del hielo (LaRue *et al.*, 2019; Tirirra, 2015). Por otra parte, la foca de Ross se aleja del hielo antártico y pasa la mayor parte de su vida en mar abierto (Blix y Nordoy, 2007; Arcalís-Planas *et al.*, 2015). Si bien ambas especies se encuentran a bajas temperaturas, *O. rossii* es mucho más tolerante a las altas temperaturas, mientras que *L. weddelli*, la que prefiere las bajas temperaturas (Forcada, 2007). Cabe destacar que las plataformas como el hielo marino resultan sensibles a pequeños cambios de temperatura. Por esto, los efectos más importantes del calentamiento global sobre la megafauna, mediados por el aumento de la temperatura de la atmósfera y del océano, están relacionados con la alteración de la dinámica del hielo, tanto marino como terrestre, de su grosor y de su extensión en el espacio y el tiempo (Forcada, 2007). Estas dos últimas variables ambientales son sumamente importantes ya que La mayoría de las poblaciones de megafauna estudiadas en diversas regiones del océano Antártico muestran cambios o fluctuaciones que en última instancia se correlacionan con los efectos del calentamiento global sobre el medio físico, es decir, con aumentos significativos de la temperatura y reducciones en la extensión del hielo marino (Forcada, 2007)

Respecto a la foca de Weddell Sniff *et al.* (2008) afirmaron que es una especie muy sensible a los cambios en el hielo marino, ya que tanto la disminución como el aumento de la extensión y el espesor del hielo fijo influyen en el éxito de las crías en esta especie. La disminución de la persistencia del hielo marino en la región de la Península parece haber afectado negativamente a esta especie, al igual que el aumento a corto plazo del espesor y la extensión del hielo fijo en McMurdo Sound (Mar de Ross; Sniff *et al.*, 2008). Estos cambios ambientales registrados y potenciados a través del tiempo debido al cambio climático, reflejan la disminución del rango de distribución de la especie tanto en la Península Antártica como en el Mar de Ross. En un estudio de mediados el siglo XX, la distribución y abundancia de la foca de Weddell, durante 1967 y 1968 en el hielo fijo y en el hielo del Mar de Ross occidental, fue de alrededor de 50.000 focas de Weddell en el oeste del Mar de Ross (Stirling, 1969). Esto sustenta históricamente la capacidad y la calidad de este hábitat para mantener poblaciones de la especie. Sin embargo, en el presente estudio se predijo que la distribución de la especie *L. weddellii* disminuiría en la zona del mar de Ross, lo cual

concuera, además, con estudios recientes que comparan los datos históricos utilizando imágenes satelitales de alta resolución (0,6 m²) durante 2008-2012 (Ainley, 2015). Este trabajo estima una menor abundancia de focas de Weddell en dos áreas principales de muda en el oeste del Mar de Ross. Por lo tanto, la disminución de esta especie en esta área comenzó hace años atrás, y nuestros resultados proyectan esta tendencia al futuro con una reducción significativa del rango de distribución (véase Fig. 6).

Por otro lado, Wege et al. (2021) sugieren que el cambio climático probablemente alterará el comportamiento de búsqueda de alimento de las focas de Ross (*Ommatophoca rossii*). En relación con esto, estos autores proponen que gastarán menos energía mientras bucean debido a la formación de bancos de capas mixtas y nadarán distancias más cortas en el invierno debido a la contracción del hielo marino. Sin embargo, en el verano austral, los individuos después de la reproducción deberán nadar distancias más largas para llegar a aguas abiertas, por lo tanto, sus respuestas serán regionalmente específicas a los cambios climáticos en lugar de uniformes. La distribución de esta especie en todo el mar de Weddell es poco concluyente, aunque los artículos de descripción general suelen describir su presencia para toda esta área geográfica (Bester et al., 2020). La espesa capa de hielo plurianual presente en el mar de Weddell y la mayor distancia para nadar hasta el océano abierto probablemente hacen que el sur del mar de Weddell sea un hábitat inadecuado para la foca de Ross, lo que concuerda con la baja idoneidad predicha por los modelos dentro de la bahía del mar de Weddell durante todo el año (Wege et al., 2021). Adicionalmente, el comportamiento pelágico de alimentación de las focas de Ross las hace menos susceptibles al cambio climático en comparación con otras focas antárticas (Sniff et al., 2008). Estos autores sugieren que pueden ser consideradas como especies beneficiadas por el cambio climático, porque la distancia cada vez menor entre el continente y el borde del hielo marino en teoría requeriría que las focas de Ross no consuman más energía para nadar a mayores distancias para alcanzar sus zonas de alimentación. La foca de Ross es la especie de foca antártica menos estudiada y hasta ahora es poco conocido su comportamiento en el mar de Amundsen (Arcalís et al., 2015). La predicción de los modelos a futuro muestra que la foca de Ross presentará un aumento en su rango de distribución en esta área en particular (véase Fig. 7), zona en la que las pérdidas de hielo están aumentando junto con el aumento de las temperaturas de la superficie del mar (Zhang, 2007; Bintanja et al., 2013; Meehl et al., 2016). Esto es sumamente relevante a la hora de generar áreas de conservación y planificación de eventuales estudios sobre esta especie.

Los resultados de esta investigación pueden utilizarse para diseñar políticas de conservación (Lazo-Cancino et al., 2020). Especialmente ya que en la actualidad todavía falta una evaluación ecosistémica completa de los efectos generales del cambio climático en el Océano Austral y se ha identificado como una de las preguntas de investigación prioritarias para futuras investigaciones (Kennicutt et al., 2014; Gutt et al., 2015). La planificación y gestión de áreas protegidas se centraría en áreas donde los rangos presentes y futuros se superponen para cumplir con los requisitos mínimos de rango para las especies (Midgley et al., 2003). Esto sustentado en que la primera respuesta de las especies al cambio climático

sería un cambio en la distribución que permitiría rastrear áreas geográficas con las condiciones ambientales preferidas (Pecl *et al.*, 2017).

Es importante considerar que un modelo de distribución de especies solo predice las variables que son utilizadas para generar dicho modelo, y que existen variables potencialmente más idóneas que tienen relación con interacciones bióticas u otros predictores ambientales no disponibles a esta escala de análisis (*e.g.*, variabilidad interanual de las variables ambientales) que forman parte del hábitat de las focas (Wege *et al.*, 2021). Así mismo también es importante destacar que se ha mencionado en estudios que hacia finales de siglo, el hielo marino disminuirá en todo el continente antártico alrededor de un 25% (Gutt *et al.*, 2015; Forcada, 2007) y que aumentarán las temperaturas de todas las masas de agua (Meijers, 2014), por lo que los resultados de esta investigación con proyecciones hacia el año 2100, revelan una disminución del hielo marino en todo el continente antártico y aumento de temperaturas en todas las masas de aguas antárticas. No obstante, es crucial abordar los cambios ambientales que están ocurriendo a corto plazo, como el aumento en el grosor del hielo marino en McMurdo Sound, que podría explicar la migración o la disminución de la población en distintas áreas antárticas.

CONCLUSIÓN

Este estudio proporciona la primera predicción sobre la idoneidad de hábitat bajo escenarios del cambio climático para *Leptonychotes weddellii* y *Ommatophoca rossii*. Nuestros resultados respaldaron una disminución en el rango de distribución para *L. weddellii* y una leve expansión en el rango de distribución para *O. rossii* según las proyecciones futuras del cambio climático. Estos resultados pueden utilizarse para políticas de conservación más efectivas. Sin embargo, se requiere aumentar el conocimiento sobre las especies, en particular sobre *O. rossii*. El poco conocimiento que se tiene hasta el momento sobre la foca de Ross podría tener impactos negativos para su gestión.

Finalmente, no es posible rechazar la hipótesis planteada de que como consecuencia del cambio climático el deshielo ampliará el rango de distribución de *Ommatophoca rossii* debido al aumento de sus características de hábitat preferidas y disminuirá el rango de distribución de *Leptonychotes weddellii* debido a la pérdida de hábitat.

BIBLIOGRAFÍA

Ainley, DG., MA. Larue, I. Stirling, S. Stammerjohn y DB. Siniff. 2015. Una aparente disminución de la población, o cambio en la distribución, de focas de Weddell a lo largo de la costa de la Tierra Victoria. *Ciencia de los mamíferos marinos* , 31 (4), 1338-1361.

Anderson, D. y K. Burnham. 2004. Selección de modelos e inferencia multimodelo. Segundo. Nueva York: Springer-Verlag, 63 (2020), 10.

Arcalís, A., S. Sveegaard, O. Karlsson, KC. Harding, A. Wåhlin, T. Harkonen, et al. 2015. Uso limitado del hielo marino por parte de la foca de Ross (*Ommatophoca rossii*) en el mar de Amundsen, Antártida. Utilizando datos de telemetría y teledetección. *Polar Biol.* 38, 445–461.

Arcalís-Planas, A., S. Sveegaard, O. Karlsson, KC. Harding, A. Wåhlin, T. Harkonen, y J. Teilmann. 2015. Uso limitado del hielo marino por parte de la foca de Ross (*Ommatophoca rossii*), en el mar de Amundsen, Antártida, utilizando datos de telemetría y teledetección. *Biología polar* , 38 , 445-461.

Assis, J., L. Tyberghein, S. Bosh, H. Verbruggen, EA. Serrão, y O. De Clerck. 2017. Bio-ORACLE v2.0: Ampliación de capas de datos marinos para la modelización bioclimática. *Ecología Global y Biogeografía*.

Barbosa, A. 2011. Efectos del cambio climático sobre pingüinos antárticos. *Ecosistemas*, 20(1): 33-41.

BEGON, M., C. TOWNSEND y J. HARPER. 2006. *Ecology from individuals to ecosystems*. Blackwell Publishing. U.S.A. 752 pp.

Bester, MN., M. Wege, WC. Oosthuizen, y H. Bornemann. 2020. Distribución de las focas de Ross en el mar de Weddell: realidad y falacia. *Biología polar* , 43 , 35-41.

Bintanja, R., GJ. Van Oldenborgh, SS. Drijfhout, B. Wouters y CA. Katsman. 2013. Papel importante del calentamiento de los océanos y el aumento del derretimiento de las plataformas de hielo en la expansión del hielo marino de la Antártida. *Nat. Geociencias*. 6, 376–379.

Blix, AS y ES. Nordøy. 2007. Foca de Ross (*Ommatophoca rossii*) distribución anual, comportamiento de buceo, reproducción y muda, frente a la Tierra de la Reina Maud, Antártida. *Biología polar* , 30 , 1449-1458.

Böning, C. W., A. Dispert, M. Visbeck, S.R. Rintoul, y F.U Schwarzkopf. 2008. The response of the Antarctic Circumpolar Current to recent climate change. *Nature Geoscience*, 1(12), 864.

Bonnet, W. N. 1982. In *Seals and Man-A Study of Interactions*. University of Washington, Seattle, 170 pp.

Boyce, MS, PR Vernier, SE Nielsen y FK Schmiegelow. 2002. Evaluación de las funciones de selección de recursos. *Modelado ecológico* , 157 (2-3), 281-300.

Boyd, PW. SC Doney, R. Strzepek, J. Dusenberry, K. Lindsay y I. Fung. 2008. Cambios mediados por el clima en las propiedades de las capas mixtas en el Océano Austral: evaluación de la respuesta del fitoplancton. *Biogeociencias*, 5(3), 847-864.

Bracegirdle, TJ, WM Connolley y J. Turner. 2008. Cambio climático en la Antártida durante el siglo XXI. *Revista de Investigación Geofísica: Atmósferas*, 113 (D3).

Bravo Cadena, J., G. Sánchez Rojas, y SM Gelviz-Gelvez. 2011. Estudio de la distribución de las especies frente al cambio climático.

Brinton, E. 1985. La estructura oceanográfica del este del Mar de Escocia—III. Distribuciones de especies de eufáusidos y sus etapas de desarrollo en 1981 en relación con la hidrografía . ***Res. de aguas profundas*** . 32 , 1153-1180.

Broennimann O, V Di Cola y A Guisan. 2023. ecospat: métodos diversos de ecología espacial . Paquete R versión 3.5.1, <https://CRAN.R-project.org/package=ecospat>

Chown, SL y CM. Brooks. 2019. El estado y el futuro de los ambientes antárticos en un contexto global . *Revisión anual de medio ambiente y recursos* , 44 , 1 – 30 .

Conil, S. y CG. Menéndez, CG. 2006. Fluctuaciones climáticas del mar de Weddell y sus alrededores en un escenario de cambio climático transitorio. *Dinámica del clima* , 27 , 83-99.

Constable, AJ, S. Nicol y PG Strutton. 2003. Productividad del océano Austral en relación con la variación espacial y temporal del entorno físico. *Revista de Investigación Geofísica: Océanos*, 108 (C4).

EEA. 2004. Impacts of Europe's changing climate. Copenhagen: European Environment Agency.

Elith, J. J.R. Leathwick. 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual review of ecology, evolution and systematics*, 40, 677-697.

Elith, J., SJ. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, YE. Chee y CJ. Yates. 2011. Una explicación estadística de MaxEnt para ecologistas. *Diversidad y distribuciones* , 17 (1), 43-57.

Fick, SE y RJ Hijmans. 2017. Worldclim 2: Nuevas superficies climáticas de resolución espacial de 1 km para áreas terrestres globales, *Revista Internacional de Climatología*.

Forcada, J. 2007. Cambio climático y sus repercusiones en la megafauna de la Antártica, *british antarctic survey*, Cambrige, 111pp.

García, M., F. Elorriaga. 2019. Los pinnípedos: carnívoros acuáticos altamente especializados. *Revista ciencia*, 70(3), 72-79pp.

GBIF.org (17 July 2023) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/d1.3apegi>

GBIF.org (17 July 2023) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/d1.w6ce2d>

George, JC, ML. Druckenmiller, KL. Laidre, R. Suydam y B. Person. 2015. Condición corporal de la ballena de Groenlandia y vínculos con el hielo marino de verano y el afloramiento en el mar de Beaufort, *Prog. Oceanogr.*, 136, 250–262.

GUISAN, A y W. THUILLER. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecol Lett.* 8:993-991

Gutiérrez Torero, M., S. Peraltilla Neyra, S. Bertrand, A. Gonzales Salas, G. Swartzman y R. Castillo Valderrama. 2006. Distribución, abundancia y proximidad espacial de enjambres de krill (*Euphausia superba*) en el estrecho de Bransfield y alrededores de la isla Elefante, verano austral 2006.

Gutt, J., N. Bertler, T.J. Bracegirdle, A. Buschmann, J. Comiso, G. Hosie, et al. 2015. El ecosistema del Océano Austral bajo múltiples tensiones del cambio climático: una evaluación circumpolar integrada. *Globo. Chang. Biol.* 21, 1434-1453.

Hanley JA, BJ McNeil. 1982. El significado y el uso del área bajo una curva característica operativa del receptor (ROC). *Radiología*; 143: 29-36.

Hansen, J., R. Ruedy, J. Glascoe y M. Sato. 1999. Análisis GISS del cambio de temperatura superficial. *J Geophys. Res.* 104:30997-31022.

Hijmans RJ, S Phillips, J Leathwick, Elith. 2023. dismo: Modelado de Distribución de Especies. Paquete R versión 1.3-14, <http://CRAN.R-project.org/package=dismo>

Hirzel, AH, G. Le Lay, V. Helfer, C. Randin, y A. Guisan. 2006. Evaluar la capacidad de los modelos de idoneidad del hábitat para predecir la presencia de especies. *Modelado ecológico* , 199 (2), 142-152.

HUGHES, L.. 2000. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?. *Trends Ecol, Evol.*, 15: 56-61.

Hulme, M., GJ Jenkins, X. Lu, JR Turnpenny, TD Mitchell, RG Jones, J. Lowe, JM Murphy, D. Hassell, P. Boorman, R. McDonald y S. Hill. 2002. Escenarios de cambio climático para el Reino Unido: el informe científico UKCIP02. Norwich: Centro Tyndall para la Investigación del Cambio Climático, 120 págs.

HUNTCHINSON, G. E. 1957. Concluding remarks. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology 22:415-427.

HUNTLEY, B.. 1995. Modelling present and potential future ranges of some European higher plants using climate response surface. J Biogeogr, 22:967-101.

IPCC. 2014. Cambio Climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 pp.

J. Turner; R. Bindaschadler; P. Convey; G. di Prisco; E. Fahrback; J. Gutt; D. Hodgson; P. Mayewski y Colin Summerhayes. 2009. Antarctic climate change and the environment. Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR).

Jueterbock, A., I. Smolina, JA Coyer y G. Hoarau. 2016. El destino de las algas árticas *Fucus distichus* bajo el cambio climático: un enfoque de modelado de nicho ecológico. Ecología y Evolución 6(6) 1712-1724.

Kass, JM, GE Pinilla-Buitrago, A. Paz, BA Johnson, V. Grisales-Betancur, SI Meenan, D. Attali, O. Broennimann, PJ Galante, BS Maitner, H. Owens, S. Varela, C. Merow, ME Blair y RP Anderson. 2023. wallace 2: una aplicación brillante para modelar nichos y distribuciones de especies rediseñada para facilitar la expansión a través de contribuciones de módulos. Ecografía, e06547. <https://doi.org/10.1111/ecog.06547>

Kass, J.M., Pinilla-Buitrago, G.E., Paz, A., Johnson, B.A., Grisales-Betancur, V., Meenan, S.I., Attali, D., Broennimann, O., Galante, P.J., Maitner, B.S., Owens, H., Varela, S., Aiello-Lammens, Merow, C., M.E., Blair, M.E. y Anderson, R.P. (2023). wallace 2: a shiny app for modeling species niches and distributions redesigned to facilitate expansion via module contributions. Ecography, e06547. <<https://doi.org/10.1111/ecog.06547>

Kennicutt, MC II, SL. Chown y J. Cassano. 2014. Seis prioridades para la ciencia antártica. *Naturaleza* 512, 23-25. doi: 10.1038/512023^a

Kokubun, N., Y. Tanabe, D. Hirano, V. Mensah, T. Tamura, S. Aoki, S y A. Takahashi. 2021. La intrusión costera de aguas superficiales oceánicas altera las estructuras físicas y biológicas del océano en la plataforma continental antártica durante el invierno: observaciones de focas instrumentadas. *Limnología y Oceanografía*, 66(10), 3740-3753.< /span>

LaRue, M. A., L. Salas, N. Nur, D.G. Ainley, S. Stammerjohn, L. Barrington y H. Nakamura. 2019. Physical and ecological factors explain the distribution of Ross Sea Weddell seals during the breeding season. *Marine Ecology Progress Series*, 612, 193-208.

Laws, R.M. 1977. Seals and whales of the Southern Ocean. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 279, 81–96.

Lazo-Cancino, D., R. Rivera, K. Paulsen-Cortez, N. González-Berrios, R. Rodríguez-Gutiérrez, y R. Rodríguez-Serrano. 2020. Los impactos del cambio climático en la distribución del hábitat de la especie vulnerable patagónico-fueguiana *Ctenomys magellanicus* (Rodentia, Ctenomyidae). *Revista de ambientes áridos* , 173 , 104016.

LEEMANS, R y P. HAPIN. 1992. Global change and biodiversity, En: Chapman y hall (eds.) biodiversity 1992: status of the earth's living resources, London.

López García, M. A. 2007. Descripción y caracterización de nichos ecológicos: una visión más cuantitativa del espacio ambiental. Centro de Investigación en Matemáticas, AC.

MACARTHUR, R. 1972. Geographical ecology: patterns in the distribution of species. Harper and Row. New York. 269 pp

Massom, R. A., y S. E. Stammerjohn. 2010. Antarctic sea ice change and variability—physical and ecological implications. *Polar Science*, 4(2), 149-186.

Meehl, GA., JM. Arblaster, CM. Bitz, CTY. Chung y H. Teng. 2016. La expansión del hielo marino antártico entre 2000 y 2014 fue impulsada por la variabilidad climática decenal del Pacífico tropical. *Nat. Geociencias*. 9, 590–595.

Meijers, AJS. 2014. El océano Austral en la fase 5 del proyecto de intercomparación de modelos acoplados. *Philos. Trans. R. Soc. Una Matemática. Física. Ing. Ciencia*. 372:20130296.

Meza, M. A., y M. Ochoa. 2021. Avistamiento de aves marinas antárticas y su relación con el krill (*Euphausia superba*). *ANTAR XXVI. Boletín Instituto del Mar del Perú*, 36(1), 54-67.

Midgley, GF., L. Hannah, D. Millar, W. Thuiller y A. Booth. 2003. Desarrollar evaluaciones regionales y a nivel de especie de los impactos del cambio climático en la biodiversidad en la Región Florística del Cabo. *Conservación biológica*, 112 (1-2), 87-97.

Miller DGM y I. Hampton I. 1989. Biología y ecología del krill antártico (*Euphausia superba* Dana): una revisión. *En Investigaciones biológicas de sistemas y poblaciones marinos antárticos (BIOMASS) vol. 9* Cambridge, Reino Unido: SCAR y SCOR.

Moore, S.E., H.P. Huntington. 2008. Article marine mammals and climate change: impacts and resilience. *Ecol. Appl*, 18, S157–S165.

Moss, RH, JA Edmonds, KA Hibbard, MR Manning, SK Rose, DP Van Vuuren, ... y TJ Wilbanks. 2010. La próxima generación de escenarios para la investigación y evaluación del cambio climático, *Nature*, 463(7282), 747-756.

Murphy, E., DJ. Morris, JL. Watkins y J. Priddle. 1988. Escalas de interacción entre el krill antártico y el medio ambiente. *El océano Antártico y la variabilidad de los recursos* y Sahrhage. págs. 120-130. Editores. Berlín, Alemania: Springer.

Naimi B, Na Hamm, TA Groen, AK Skidmore, AG Toxopeus. 2014. "¿Dónde es la incertidumbre posicional un problema para el modelado de distribución de especies?" *Ecografía*, 37, 191-203. doi:10.1111/j.1600-0587.2013.00205.x.

Nicol, S., A. Worby y R. Leaper. 2008. Cambios en el ecosistema del hielo marino antártico: efectos potenciales sobre el krill y las ballenas barbadas. *Investigación marina y de agua dulce*, 59(5), 361-382.

OBIS.org (31 august 2023) OBIS Ocurrence
Download <https://datasets.obis.org/downloads/6ee66549-f3a3-4de5-84e6-1aae9c00c351.zip>.

OBIS.org (31 august 2023) OBIS Ocurrence
Download <https://datasets.obis.org/downloads/94b647ed-4137-488d-b06d-9e5de0326659.zip>.

Osorio-Olvera L, A. Lira-Noriega, J. Soberón, AT Peterson, M. Falconi, RG Contreras-Díaz, E. Martínez-Meyer, V. Barve, N. Barve. 2020. ntbox: un paquete r con interfaz gráfica de usuario para modelar y evaluar nichos ecológicos multidimensionales. *Métodos en Ecología y Evolución* 11(10): 1199-1206. DOI: 10.1111/2041-210X.13452

PARMESAN, C y G. YOHE. 2003. A global coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems, *Nature*, 421:37-42.

Pearson, R. G., T.P. Dawson. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?, *Global ecology and biogeography*, 12(5), 361-371.

Pecl, G. T., M.B. Araújo, J.D. Bell, J. Blanchard, T.C. Bonebrake, I.C. Chen y S.E. Williams. 2017. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355(6332), eaai9214.

Peterson, AT, M. Papes, y J. Soberón. 2008. Repensar las aplicaciones de análisis de características operativas del receptor en el modelado de nichos ecológicos, *Modelado ecológico* , 213 (1), 63-72.

Phillips, SJ, RP Anderson, M. Dudik, RE Schapire y ME Blair. 2017. Abriendo la caja negra: una versión de código abierto de Maxent, *Ecography*, 40(7), 887-893.

Porrúa, M. E. 2001. Cambio climático global: causas y consecuencias. *Rev. Inf. y Análisis*, 1, 7-17.

QGIS Development Team. 2023. QGIS Geographic Information System, Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

R Core Team.2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R., Schneider, S.H., Rosenzweig, C., Pounds, J.A. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants, *Nature* 421, 57–60.

Russo, R. O., y B. Kohlmann. 2013. Cambio Climático: efectos sobre la Biodiversidad, *Materiales de Enseñanza*.

Morande Sanhueza, I. 2017. Impactos del cambio climático en la antártica.

Siniff, D. B., R.A. Garrott, J.J Rotella, W.R. Fraser, y D.G. Ainley, .2008. Opinion: Projecting the effects of environmental change on Antarctic seals. *Antarctic Science*, 20(5), 425-435.

Smetacek, V. y S. Nicol. 2005. Ecosistemas oceánicos polares en un mundo cambiante. *Naturaleza* , 437 (7057), 362-368.

Smetacek, V., y S. Nicol. 2005. Polar ocean ecosystems in a changing world. *Nature*, 437(7057), 362.

Sokolov, S., y S. R. Rintoul. 2009. Circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts: 1. Mean circumpolar paths. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C11).

Southwell, C., J. Bengston, M. Bester, AS. Blix, H. Bornemann, P. Boveng, M. Cameron, J.

Forcada, J. Lakee, E. Nordøy, J., Plötz, T. Rogers, D. Southwell, D. Steinhage, BS. Stewart, P. Trathan. 2012. Una revisión de datos sobre abundancia, tendencias en abundancia, uso de hábitat y dieta de focas que se reproducen en hielo en el Océano Austral, *CCAMLR Science*, 19. 49-74.

Stammerjohn, S., R. Massom, D. Rind y D. Martinson. 2012. Regiones de cambios rápidos en el hielo marino: una comparación estacional interhemisférica. *Cartas de investigación geofísica*, 39(6).

Stirling, I. 1969. Distribution and abundance of the Weddell seal in the western Ross Sea, Antarctica. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 3(2), 191-200.

SWETS, John A. 1988. Medición de la precisión de los sistemas de diagnóstico. *Ciencia*, vol. 240, n° 4857, pág. 1285-1293.

Thea, K. 2015. Movement, habitat, and foraging behavior of weddell seals (*leptonychotes weddellii*) in the western ross sea, antarctic. University of California. California.

Thuiller, W., D. Georges., M. Gueguen., R. Engler., F. Breiner., B. Lafourcade y R. Patin. 2023. biomod2: Ensemble Platform for Species Distribution Modeling. R package version 4.2-4. <https://CRAN.R-project.org/package=biomod2>

Tirira, DG. 2015. Notas sobre **la historia natural y estado de conservación de *Leptonychotes weddellii* (Carnivora: Phocidae) en los alrededores de la Estación Científica Pedro Vicente Maldonado, Antártida**. Tesis previa a la obtención del título de Magister en Biología de la Conservación.

Turner, J., Colwell, S. R., Marshall, G. J., Lachlan-CVope, T. A., Carleton, AM., Jones, P. D., Lagun, V., Reide, PA and Lagovkina, S. 2005. Antarctic climate change during the last 50 years. *Int. J. Climatol.*, 25: 279-294.

Tyberghein L., H. Verbruggen, K. Pauly, C. Troupin, F. Mineur, O. De Clerck .2012. Bio-ORACLE: A global ambiental dataset for marine Modelado de distribución de especies. *Ecología global y biogeografía*, 21, 272–281

Vásquez, J. 2016. El krill antártico: ¿base se la biodiversidad antártica?.

VÁZQUEZ, D. 2005. Reconsiderando el nicho hunchinsoniano. *Ecol., Austral*, 15:149-158.

VELÁZQUEZ, J. 2002. Agrofenoeclimatología. México, Universidad Autónoma del Estado de México. 338 p

Watkins JL y AWA. Murray. 1998. Capas de krill antártico, *Euphausia superba*: ¿son simplemente largos enjambres de krill? . *Mar. Biol.* **131** , 237–247.

Watkins JL., DL. Morris, C. Ricketts y J. Priddle. 1986. Diferencias entre enjambres de krill antártico y algunas implicaciones para el muestreo de poblaciones de krill . *Mar. Biol.* **93** , 137-146

Wege, M., H. Bornemann, A.S. Blix, E.S. Nordøy, L. Biddle y M.N. Bester. 2021. Distribution and habitat suitability of Ross seals in a warming ocean. *Frontiers in Marine Science*, 8, 659430.

Wege, M., L. Salas, y M. LaRue. 2021. El hielo importa: las estrategias de la historia de vida de dos focas antárticas dictan las eventualidades del cambio climático en el mar de Weddell. *Biología del cambio global* , 27 (23), 6252-6262.

Würsig, Thewissen y Kovacs. 2018. Encyclopedia of Marine Mammals. Academic Press,

Würsig; R. R. Reeves y J. G. Ortega-Ortiz. 2002. Global climate change and marine mammals. *Marine Mammals: Biology and Conservation*, 589-608 pp. Springer, Boston, MA.

Zhang, J. 2007. Aumento del hielo marino antártico debido al calentamiento de las condiciones atmosféricas y oceánicas. *J. Clim.* 20, 2515–2529.