



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y  
OCEANOGRÁFICAS



Potenciales cambios en la distribución  
del caracol endémico antártico *Neobuccinum eatoni* (E.A. Smith, 1875), ante  
un océano cambiante

Rosvita Ivonne González Queipul

Seminario de Título presentado al  
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA  
DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Para optar al Título de  
BIÓLOGA MARINA

Concepción, Chile 2023

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA

Este Seminario de Título ha sido realizado en el Departamento de Oceanografía de la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas.

Docente Guía

\_\_\_\_\_  
Dra. Angie Díaz Lorca

Docente Patrocinante

\_\_\_\_\_  
Dr. Erasmo Macaya Horta

Ha sido aprobada por la  
siguiente Comisión Evaluadora

\_\_\_\_\_  
Dra. Laura Farías

\_\_\_\_\_  
Dr. Pablo Guerrero

Jefe de Carrera

\_\_\_\_\_  
Dr. Ariel Valenzuela

*“Si existe magia en este planeta, está contenida en el agua”*

*LOREN EISELEY*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la vida por brindarme la oportunidad de experimentar este bello proceso académico, uno completamente distinto y emocionante en tantos aspectos. A todas aquellas personas que hicieron posible el desarrollo y término de este seminario de título.

A mi amado compañero de tantas temporadas, por instarme desde el día uno a seguir mis anhelos. Gracias por tu incondicional compañía, atención y por tu noble corazón.

Agradezco a mi profesora guía Dra. Angie Díaz, por hacerme parte de su grupo de trabajo, por su disposición a resolver cada duda de la forma más clara posible, por toda la literatura recomendada para nutrir mi aprendizaje y por compartir su gran conocimiento particularmente en temas relacionados con Antártica. Gracias al equipo LEMMAR por el compañerismo siempre presente y por el apoyo brindado que hizo este proceso más llevadero.

Agradezco al Dr. Pablo Guerrero que de igual manera me brindó un espacio en su laboratorio para llevar a cabo las primeras etapas de este trabajo, dispuesto a responder cada duda que surgía en el proceso. Al equipo BIOMAS, gracias por el apoyo en una de las etapas cruciales de este trabajo, por las sugerencias, comentarios y apoyo en las presentaciones.

A los académicos que integran mi comisión, Dr. Erasmo Macaya y Dra. Laura Farías gracias por el saber y experiencias compartidas durante esta bella etapa de formación como Bióloga Marina.

Finalmente agradezco a las distintas fuentes de financiamiento que me otorgaron su apoyo durante el desarrollo de esta investigación: Fondecyt de iniciación 11190906 “Cryptic speciation in the Southern Ocean: integrating genomics, morphology and species distribution models to elucidate the speciation process of a gastropod group” a cargo de la Dra. Angie Díaz, al Millennium Institute Biodiversity of Antarctic and Sub-Antarctic Ecosystems (BASE) y al Instituto de Ecología y Biodiversidad con su IEB-BASAL: FB210006.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>10</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
1.1. Modelo de estudio .....	16
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>17</b>
<b>3. HIPÓTESIS.....</b>	<b>17</b>
<b>4. OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
4.1. Objetivo general .....	17
4.2. Objetivos específicos .....	18
<b>5. METODOLOGÍA.....</b>	<b>18</b>
5.1. Datos de ocurrencias.....	18
5.2. Trayectorias de Concentración Representativa (RCPs).....	21
5.3. Variables ambientales.....	23
5.4. Selección de variables ambientales .....	24
5.5. Modelos de Distribución de Especie (MDE).....	26
<b>6. RESULTADOS .....</b>	<b>27</b>
<b>7. DISCUSIÓN .....</b>	<b>34</b>
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>40</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>41</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> La Corriente Circumpolar Antártica (AAC) y los distintos frentes. STF: Frente Subtropical, SAF: Frente Subantártico, PF: Frente Polar y el SACCF: Frente meridional de la Corriente Circumpolar Antártica. Fuente: (Kato, 2020).....	14
<b>Figura 2.</b> Esquema simplificado de la circulación oceánica profunda global. Las cintas en azul representan flujos profundos y las cintas en rojo representan flujos de baja o mediana profundidad. Se indican las zonas de formación de agua profunda, una de ellas en el Océano Austral. Fuente: Avsa (2009).....	15
<b>Figura 3.</b> Círculos en color naranja corresponden a ocurrencias georreferenciadas de <i>N. eatoni</i> en el Océano Austral (n=185). Registros obtenidos desde la base de datos GBIF, desde el Museo Nacional de Historia Natural de París y desde la Colección científica de la Universidad de Vigo, España. ....	20
<b>Figura 4.</b> Patrón de cambio de presencia de <i>N. eatoni</i> en relación a latitud y profundidad. Ocurrencias georreferenciadas obtenidas desde la base de datos GBIF, Museo Nacional de Historia Natural de París y desde la Colección científica de la Universidad de Vigo, España. Son consideradas sólo aquellas ocurrencias que presentan profundidad de muestreo (n =159). 21	
<b>Figura 5.</b> Cambio proyectado en la temperatura media global en superficie (a) y elevación del nivel medio global del mar (b) de 2006 a 2100 en los distintos escenarios RCP que proyecta el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Fuente: IPCC (2014b).....	23
<b>Figura 6.</b> Proyección de la distribución potencial de <i>N. eatoni</i> para el presente (a, d) y para los años 2050 y 2100 basados en escenario RCP 4.5 (b, c) y RCP 8.5 (e, f) de cambio climático IPCC. ....	30
<b>Figura 7.</b> Área (km <sup>2</sup> ) con probabilidad de presencia (y su desviación estándar) >70% de <i>N. eatoni</i> en el Océano Austral. Proyecciones para el presente y para los escenarios de simulación climática propuesta por el IPCC. ....	31

**Figura 8.** Región subantártica del Archipiélago de Kerguelen y áreas donde se proyecta >70% de probabilidad de presencia de *N. eatoni* en diversos escenarios de cambio climático del IPCC. ....32

**Figura 9.** Comparación de la proyección de probabilidad de presencia (>70%) de *N. eatoni* en el Archipiélago de Kerguelen e Islas Heard y McDonald en el presente (a) y en escenario de cambio climático RCP 8.5 proyectado para el año 2100 (b). Círculos naranjos que representan a las ocurrencias georreferenciadas de *N. eatoni* se solapan a estas proyecciones.

33

**Figura 10.** Espesor máximo de hielo (m) en el Océano Austral, para el período 2000-2014 (a), para el periodo 2090-2100 en RCP 4.5 (b) y RCP 8.5 (c). ....36

**Figura 11.** Cambios en el pH del océano superficial en los distintos escenarios RCP. Se destacan los escenarios de importancia para este estudio. Alta sensibilidad a la acidificación del océano en los moluscos que desarrollan estructuras de carbonato de calcio. Adaptado de IPCC (2014b).....39

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Set de variables ambientales no correlacionadas, utilizadas para la ejecución de los modelos.....	24
<b>Tabla 2.</b> Contribución de las variables ambientales a cada modelo según la media de las tres permutaciones realizadas para cada modelo.....	27

## RESUMEN

Antártica es considerada una región mayoritariamente libre de impactos antropogénicos directos, sin embargo, procesos globales como el cambio climático actual y sus efectos, se encuentran impulsando importantes transformaciones que afectan de manera particular al Océano Austral y sus condiciones oceanográficas. Se espera que cambios como el aumento de la temperatura superficial del mar, el aumento de la velocidad de los vientos del Oeste y la pérdida de hielo, entre otros, provoquen alteraciones en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas marinos, desencadenando cambios en los patrones de distribución latitudinal de las especies. La fauna bentónica del Océano Austral por sus particulares características como la estenotermia, longevidad extrema y lento relevo generacional, es considerada particularmente vulnerable ante los cambios ambientales que se espera ocurran en esta región del planeta, ya que le impone radicales respuestas como migrar hacia nuevos hábitats idóneos o extinguirse en algunas localidades. Es así, que en esta investigación se evaluó la influencia de dos escenarios de cambio climático del IPCC sobre los patrones de distribución del gasterópodo endémico del Océano Austral, *Neobuccinum eatoni*. Para proyectar la probable respuesta de la especie se utilizaron Modelos de Distribución de Especies (MDE) como una herramienta que permitió explorar la respuesta geográfica de la especie a los cambios ambientales propuestos para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 para dos períodos futuros (2040-2050 y 2090-2100). Los resultados sugieren que los potenciales cambios en la distribución de *N. eatoni* serán más significativos a largo plazo en escenario RCP 8.5, con un aumento concentrado principalmente alrededor del continente y una significativa reducción de hábitat idóneo en la región subantártica del Archipiélago de Kerguelen e Islas Heard y McDonald. Esta reducción sería impulsada principalmente por el aumento del rango de salinidad de las aguas cercanas al fondo marino, además del importante aumento de temperatura que se proyectan para este sector, lo que sumado a la conocida limitada capacidad de dispersión de la especie, la llevarían a una extinción localizada.

## ABSTRACT

Antarctica is considered a region mainly free of direct anthropogenic impacts, however, global processes such as the current climate change and its effects are driving important alterations that particularly affect the Southern Ocean and its oceanographic conditions. These changes, which include an increase in ocean surface temperature, an increase in the speed of westerly winds and the ice loss, among others, are expected to cause alterations in the structure and functioning of marine ecosystems, triggering changes in the latitudinal distribution patterns of species. The benthic fauna of the Southern Ocean, due to its particular characteristics such as stenothermia, extreme longevity and slow generational replacement, is considered particularly vulnerable to the environmental changes that are expected to occur in this region of the planet, since they impose radical responses such as migrating to new suitable habitats or becoming extinct in some localities. Hence, this research evaluated the influence of two IPCC climate change scenarios on the distribution patterns of the Southern Ocean endemic gastropod, *Neobuccinum eatoni*. To forecast the likely response of the species, Species Distribution Models (SDM) were used as a tool to explore the geographic response of the species to the environmental changes proposed for the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios for two future periods (2040-2050 and 2090-2100). The results suggest potential changes in the distribution of *N. eatoni* are more significant in the long term in the RCP 8.5 scenario, with an increase primarily around the mainland and a significant reduction of suitable habitat in the sub-Antarctic region of the Kerguelen Archipelago and Heard and McDonald Islands. This reduction would be driven mainly by the increase in the salinity range of the waters near the ocean floor, in addition to the significant increase in temperature forecasted for this sector, which added to the known limited dispersal capacity of the species, would lead to a localized extinction.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es la variabilidad del sistema climático controlada por el intercambio de materia y energía entre atmósfera, litosfera, criosfera y biosfera (Ahmed, 2020), que provoca cambios a largo plazo en los patrones climáticos que caracterizan a diferentes regiones del mundo (Bandh et al., 2021). Durante los últimos millones de años, el patrón climático dominante en la Tierra han sido una alternancia entre largas y frías eras glaciales y breves interglaciares más cálidas (Barnes et al., 2009), provocadas por forzantes naturales como la radiación solar, la órbita solar de la Tierra, actividad volcánica, corrientes oceánicas y movimientos tectónicos (Bandh et al., 2021). Sin embargo, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en sus Informes de Evaluación, el último emitido el año 2022, indica que la actividad humana es la causa dominante del calentamiento generalizado que se observa en nuestro planeta desde mediados del siglo XX, siendo el principal responsable de la producción de gases de efecto invernadero.

El cambio climático expone a los océanos a condiciones ambientales cambiantes (Gruber, 2011), provocando alteraciones en las propiedades físicas, químicas y biológicas (Poloczanska et al., 2016; Pörtner et al., 2014). Efectos como el aumento de temperatura, olas de calor más frecuentes, aumento de la estratificación de las capas superiores del océano, aumento del nivel del mar, acidificación y desoxigenación, entre otros (Cooley et al., 2022). Se ha observado desde 1850-1900 hasta 2011-2020 un aumento de la temperatura superficial del océano en un promedio de 0,88 °C (Gulev et al., 2021). Desde 1901, el nivel medio global del mar ha aumentado 0,20 m y la tasa de aumento se está acelerando (Fox-Kemper et al., 2021). El pH de la superficie del océano ha disminuido a nivel mundial en más de 0,1 unidades por debajo de la media preindustrial de 8,17 (Pörtner et al., 2014) y la desoxigenación se ha producido en la mayoría de las regiones del mar abierto desde mediados del siglo XX (Canadell & Jackson, 2021), con registros de expansión de las zonas mínimas de oxígeno también en áreas costeras, de 42 documentadas en la década de 1960 a más de 400 en el año 2008 (Pörtner et al., 2014).

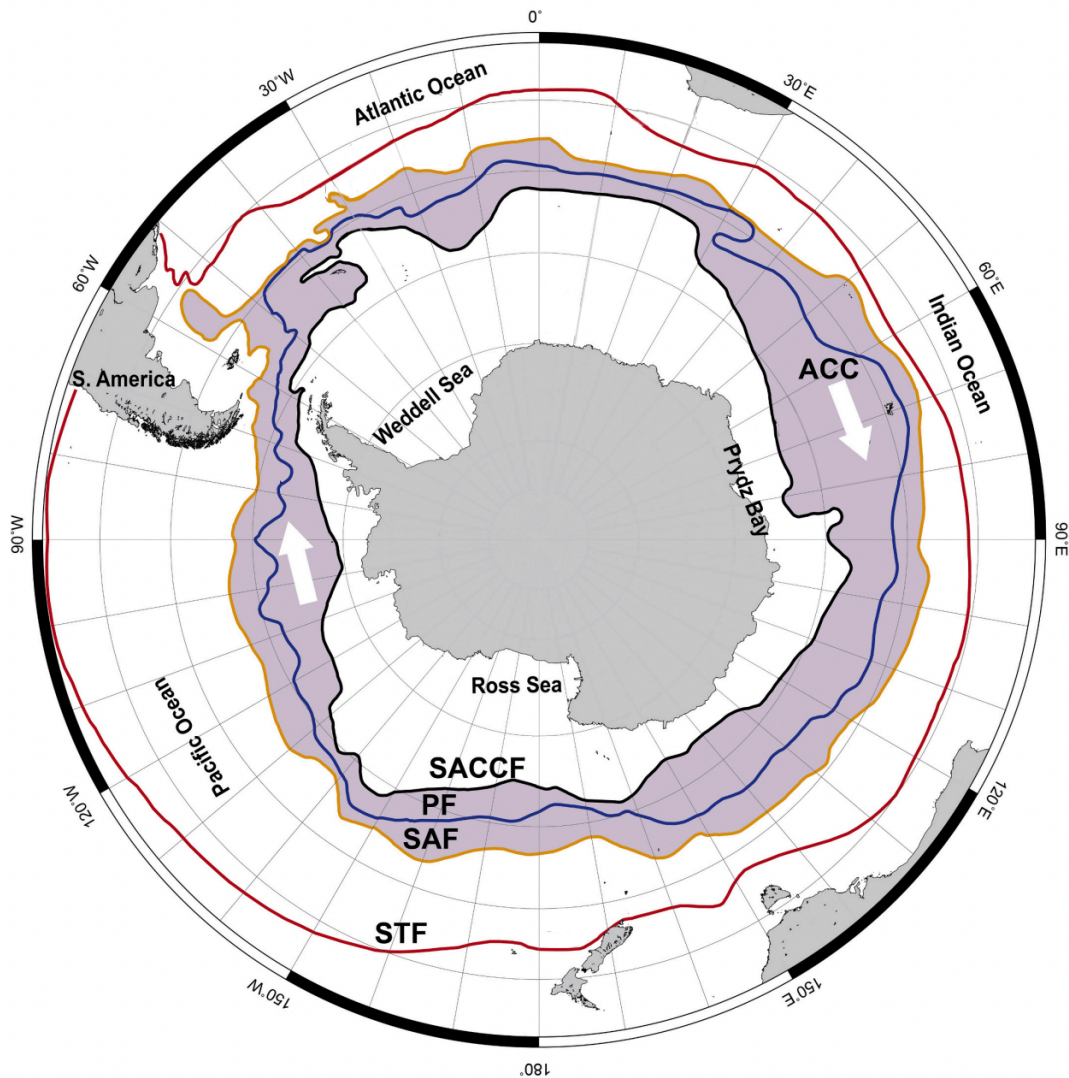
El continente Antártico es considerado como una de las últimas áreas silvestres del planeta, mayoritariamente libre de impactos antropogénicos directos (Mittermeier et al., 2003), pero no es inmune a procesos antropogénicos globales más amplios como el cambio climático (Convey et al., 2009). Es así que para el Océano Austral, los escenarios de cambio futuro proyectan un aumento del nivel del mar, aumento de la temperatura superficial del mar alrededor del continente Antártico, disminución circumpolar de la cubierta de hielo marino y mayor acidificación, con una reducción de pH entre 0,1 y 0,6 unidades de aquí al año 2100 (Constable et al., 2022). Sin embargo, diversos artículos han reportado que Antártica y el Océano Austral están experimentando actualmente las consecuencias del cambio climático, incluso a un ritmo más acelerado que otras regiones (Barnes & Peck, 2008; Guillaumot et al., 2020). El aumento de la temperatura superficial del mar (Mélise et al., 2003), de la velocidad del viento y horas de sol (Le Roux & McGeoch, 2008; Mélise et al., 2003), y la pérdida de hielo (Cavanagh et al., 2021) son efectos que impactarán principalmente en la fauna marina debido al lento relevo generacional, longevidad extrema y estenotermia que caracterizan, en general, a la fauna bentónica del Océano Austral (Barnes et al., 2009). La alteración que estos cambios provocarán en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas marinos (Gutt et al., 2015), impone a las especies responder con tolerancia, adaptación, migración o extinción; lo que a su vez desencadenaría cambios en patrones como distribución latitudinal y batimétrica (Cheung et al., 2009; Saucède et al., 2019). Sin embargo, probablemente lo más alarmante es que debido al lento relevo generacional y estenotermia, un número reducido de especies logrará adaptarse (Barnes et al., 2009).

El Océano Austral comprende las cuencas más meridionales de los océanos Atlántico, Índico y Pacífico (Moore et al., 1999), reuniendo unos 22 millones de kilómetros cuadrados, los que representan el 6,1% de la superficie oceánica global (Peck, 2018); oceanográficamente su límite norte se encuentra en el Frente Polar Antártico (FPA) (Clarke et al., 2007; Peck, 2018) el cual se caracteriza por una elevada velocidad de las corrientes y un pronunciado gradiente térmico (Moore et al., 1999; Rogers et al., 2020). Está dominado por el mayor sistema de corrientes oceánicas del mundo, la Corriente Circumpolar Antártica (CCA) (Rogers et al., 2020), que fluye alrededor del continente Antártico en dirección Oeste a Este transportando grandes volúmenes de agua desde la superficie hasta las profundidades que rodean al

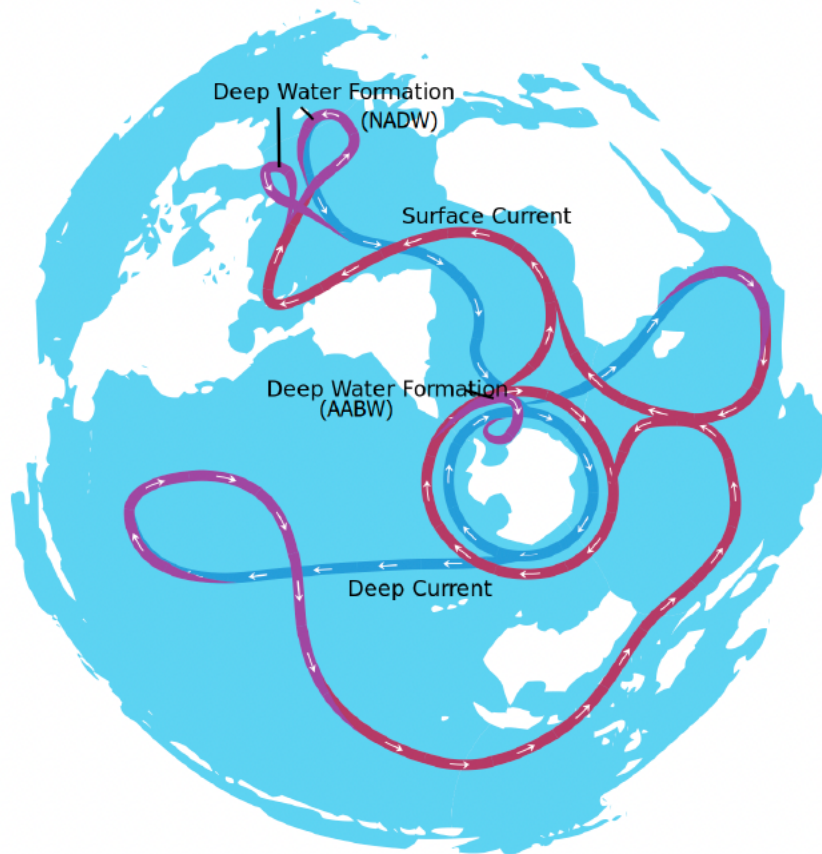
continente (~4 a 5 km) (Constantin & Johnson, 2016) y abarcando en su zona media al FPA (Figura 1) (Güller et al., 2020). Además, cumple un rol físico como centro de la circulación termohalina global, influyendo en los patrones de circulación en todo el planeta (Figura 2) (Murphy et al., 2021). Debido a sus características, el FPA y la CCA ejercen un importante rol en la limitación latitudinal de la distribución de especies entre las provincias antárticas y subantárticas (Thornhill et al., 2008), aislando al continente Antártico y sus archipiélagos e islas. Este aislamiento del océano Austral, iniciado por la apertura del Paso de Drake debido a la separación entre Antártica y Sudamérica (~30 Ma), sumado al flujo de aguas profundas de la CCA y a las glaciaciones del cuaternario (Peck, 2018), provocaron niveles excepcionalmente bajos de inmigración y emigración dando paso a la evolución in situ de nuevas especies, otorgando a lo largo del tiempo evolutivo, una serie de atributos y adaptaciones a la fauna del Océano Austral (Crame, 2018; Peck, 2018). Lo anterior, sumado a las bajas tasas de origen evolutivo neto (especiación menos extinción), han generado una fauna diversa con niveles de endemismo en torno al 50% (De Broyer et al., 2014), mientras que para algunos grupos como los moluscos gasterópodos, los porcentajes de endemismo son aún más elevados en torno al 75% (Griffiths et al., 2009).

En ecología un concepto sustancial es el *nicho*, definido como un hipervolumen  $n$  dimensional en el que los organismos existen y en el que las dimensiones representan factores ambientales cuantificables que tienen un impacto en los organismos o poblaciones, los que a su vez, responden a estos impactos (Hutchinson, 1957). Por lo tanto, la relación entre los factores abióticos y la distribución de fauna endémica es fundamental debido al control dominante que ejercen estos factores sobre la distribución natural de las especies (Pearson & Dawson, 2003), destacando su papel en el control de los límites de distribución en latitudes altas (Pianka, 1966) y su dominancia en los patrones de distribución a escalas espaciales de gran extensión (McGill, 2010). La influencia del clima en el rango de distribución de las especies adquiere en la actualidad mayor relevancia debido al cambio climático acelerado que se observa en diversas regiones del planeta, el cual es considerado como la principal amenaza para la biodiversidad y la dinámica de los ecosistemas durante las próximas décadas (Cooley et al., 2022). Todos los cambios que se observan en las condiciones oceánicas y se proyectan para el futuro, afectan de manera directa o indirecta a la fisiología y biología de

los organismos que habitan los océanos; alterando su crecimiento, reproducción, mortalidad y, en consecuencia, a la dinámica de las poblaciones dando lugar a cambios en la biogeografía, estructura comunitaria y las interacciones tróficas de los ecosistemas oceánicos (Cheung, 2018), con presumibles cambios en su nicho realizado.



**Figura 1.** La Corriente Circumpolar Antártica (AAC) y los distintos frentes. STF: Frente Subtropical, SAF: Frente Subantártico, PF: Frente Polar y el SACCF: Frente meridional de la Corriente Circumpolar Antártica. Fuente: (Kato, 2020).



**Figura 2.** Esquema simplificado de la circulación oceánica profunda global. Las cintas en azul representan flujos profundos y las cintas en rojo representan flujos de baja o mediana profundidad. Se indican las zonas de formación de agua profunda, una de ellas en el Océano Austral. Fuente: Avsa (2009).

Proyectar, evaluar y comprender cómo influye la variación de los múltiples forzantes climáticos y oceanográficos en la distribución de las especies es esencial para predecir cómo podrían verse afectadas por los diversos escenarios de cambio futuro derivados del cambio climático, que plantea el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). En este contexto, los Modelos de Distribución de Especies (MDEs) son herramientas cada vez más utilizadas que se basan en procedimientos estadísticos y en Sistemas de Información Geográfica para describir la relación entre la distribución de los registros de ocurrencia de las especies y un conjunto de descriptores ambientales que delimitan las condiciones favorables para la presencia de estas, permitiendo así predecir la distribución

potencial de las especies (Guillaumot et al., 2020). Esta representación de la idoneidad de un espacio para la presencia de una determinada especie, ha sido una herramienta útil como criterio de decisión para fines de conservación, apoyando la definición y delineación de áreas marinas protegidas (Ballard et al., 2012). Esto en propuestas desarrolladas, por ejemplo, por los comités nacionales de la Comisión para la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos (CCRVMA) y actualmente se han utilizado para evaluar la potencial respuesta y predecir cambios en el rango de distribución de especies marinas en futuros escenarios de cambio ambiental (Saucède et al., 2019), siendo aplicados a organismos pelágicos (Freer et al., 2019), bentónicos (Guillaumot et al., 2018; Jerosch et al., 2019) y mamíferos marinos (Nachtsheim et al., 2017).

### **1.1. Modelo de estudio**

Parte de la fauna marina bentónica del Océano Austral es representada por el Phylum Mollusca en el cual se describen ~600 especies (Griffiths, 2010), dentro del cual la Clase Gastropoda representa una fracción importante con alrededor de 530 especies (Clarke et al., 2007) con un elevado nivel de endemismo cercano al 75% (Griffiths et al., 2009). Dentro de esta clase, la especie *Neobuccinum eatoni* (E.A. Smith, 1875) es de particular interés debido a que es uno de los moluscos endémicos más ampliamente distribuidos en el Océano Austral, incluyendo la región subantártica del Archipiélago de Kerguelen e Isla Heard (Aldea & Troncoso, 2008; Harasewych et al., 2000), contando además con una amplia distribución batimétrica pudiendo ser muestreado desde los 5 a 2350 m (Harasewych et al., 2000). *Neobuccinum eatoni* es una especie monotípica que presenta un modo de desarrollo directo, ya que tiene una prolongada metamorfosis intracapsular de ~15 meses del cual surgen pequeños juveniles (Hain & Arnaud, 1992), de lo cual se asume una restringida capacidad de dispersión para la especie. Es un gasterópodo necrófago que se alimenta de cadáveres en el fondo marino (Schories & Kohlberg, 2016), sin embargo, también es un depredador activo que se alimenta principalmente de bivalvos filtradores como *Adamussium colbecki*, *Laternula elliptica* y *Limatula hodgsoni* (Norkko et al., 2007). Estas características y principalmente su amplia distribución geográfica en el Océano Austral, hacen de *N. eatoni* un modelo relevante para evaluar la influencia de los escenarios de cambio climático

proyectados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en los patrones de distribución de la fauna marina bentónica endémica del Océano Austral. Se espera que como resultado del aumento de la temperatura y la estrecha tolerancia térmica de las especies antárticas adaptadas al frío (Convey & Peck, 2019), en el Océano Austral ocurran cambios de rango hacia el sur, por lo que también se volverían comunes los eventos de extinciones locales en la región subantártica (Cheung et al., 2009).

## **2. ANTECEDENTES**

En el contexto de los escenarios futuros de cambio climático, se prevé que las regiones polares del planeta experimentarán transformaciones significativas, entre las que se incluyen el retroceso del hielo marino, un rápido aumento de temperatura, la elevación del nivel del mar y cambios en los patrones climático (Constable et al., 2022). Las características de la especie de gasterópodo endémico del Océano Austral *Neobuccinum eatoni*, como el presentar un desarrollo directo y prolongado con un lento relevo generacional, junto a la estenotermia que caracteriza a la biota endémica de Antártica, derivan en que la respuesta esperada sea un desplazamiento de sus áreas de distribución hacia los polos.

## **3. HIPÓTESIS**

La distribución geográfica de *Neobuccinum eatoni* se verá reducida en las regiones más septentrionales del Océano Austral como el Archipiélago de Kerguelen e Isla Heard, con potenciales extinciones locales.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. Objetivo general**

Evaluar la influencia de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 de cambio climático del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en los patrones de distribución de *Neobuccinum eatoni* en el Océano Austral

## 4.2. Objetivos específicos

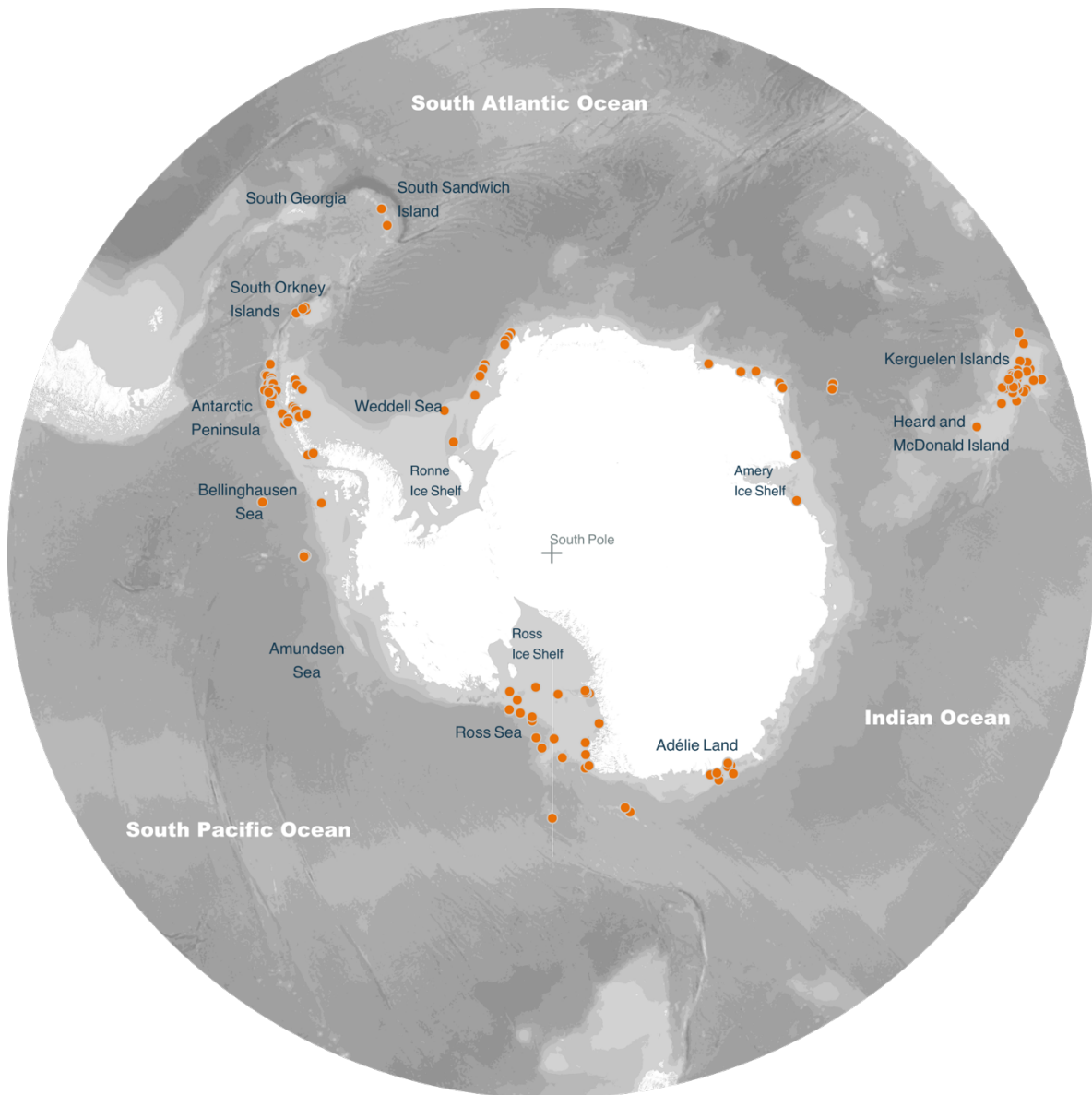
- (I) Determinar la proyección de probabilidad de presencia actual de *Neobuccinum eatoni* mediante la relación de los registros de ocurrencia de la especie y un conjunto de descriptores ambientales.
- (II) Determinar la proyección de la distribución geográfica futura de *Neobuccinum eatoni* utilizando la variación de los descriptores ambientales en el Océano Austral, según los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 que predice el IPCC.

## 5. METODOLOGÍA

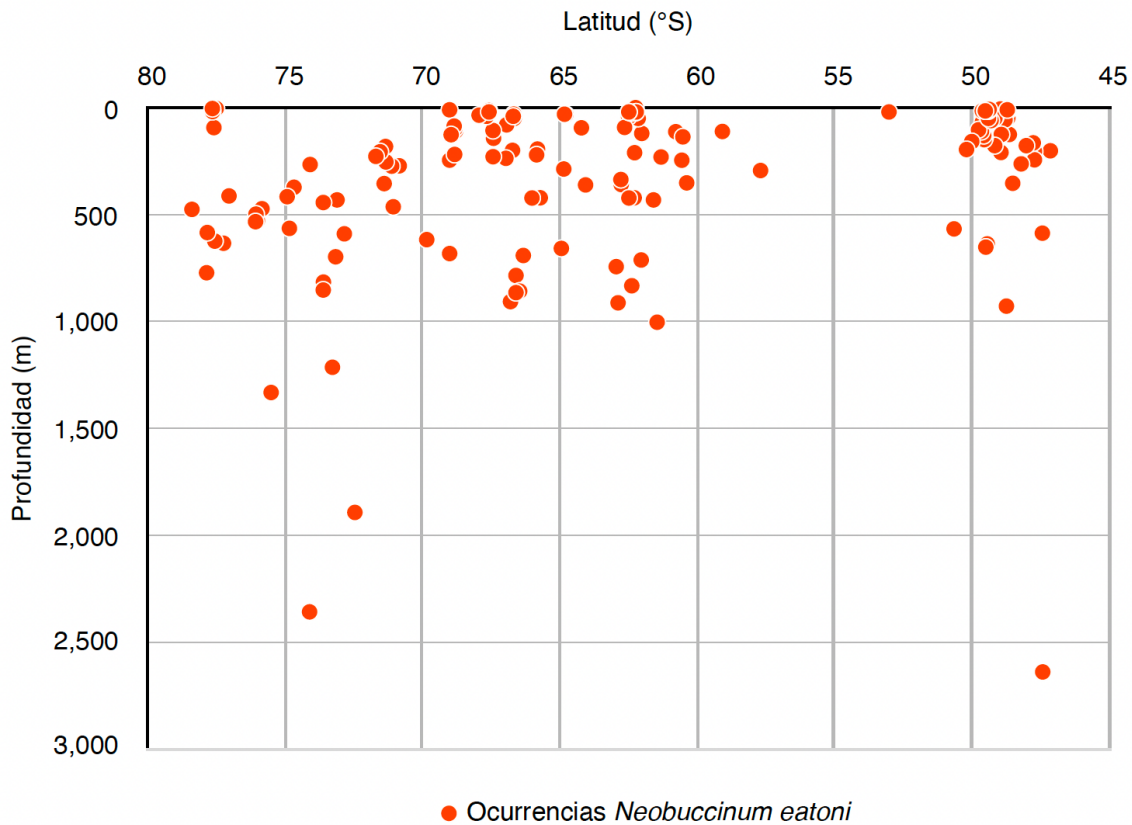
### 5.1. Datos de ocurrencias

La especie en estudio se encuentra ampliamente distribuida en el Océano Austral, incluyendo la región subantártica del Archipiélago de Kerguelen e Isla Heard (Aldea & Troncoso, 2008; Harasewych et al., 2000). Se accedió a la base de datos *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF; <http://gbif.org>) en enero de 2023, donde se verificó que esta almacena un total de 574 registros de presencia de *N. eatoni*. Se aplicó un filtro para seleccionar sólo aquellos registros que incluyen coordenadas y se descartaron aquellos especímenes conservados en museos debido a que en muchos casos los antecedentes fotográficos dan cuenta de que no corresponden a la especie o su información geográfica no es precisa, obteniendo 349 puntos de ocurrencia georreferenciados. Descargados los datos, fueron revisados manualmente eliminando puntos duplicados con el objetivo de evitar sesgos espaciales en el esfuerzo de muestreo, que son comunes cuando se utilizan base de datos (Beck et al., 2014). Se descartaron aquellos registros con más de 60 años de antigüedad, considerando una resolución temporal de presencia de la especie entre los años 1961 y 2019, reduciendo a 140 los puntos de ocurrencia obtenidos desde GBIF. Esta data almacenada proviene de diversas instituciones, tales como: Southern Ocean Mollusc Database (SOMBASE), International Barcode of Life project (iBOL), National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA), desde iniciativas como The Antarctic Biodiversity Information Facility (ANTABIF) y datos de eventos de muestreo publicados por SCAR-

AntOBIS. A estos registros obtenidos desde GBIF se sumaron 45 registros de ocurrencia derivados directamente desde el Museo Nacional de Historia Natural de París y desde la Colección científica de la Universidad de Vigo, España; disponiendo así de un total de 185 datos de presencia de *Neobuccinum eatoni* en el Océano Austral (Figura 3). Estos últimos registros obtenidos desde museos, fueron considerados ya que se verificó in situ que las muestras conservadas correspondían a la especie de interés y que su información geográfica se sitúa dentro del área de estudio. Cada registro de ocurrencia fue estandarizado a coordenadas en Grados Decimales para así lograr modelar la distribución de *N. eatoni* en el presente y proyectar su eventual cambio en el futuro.



**Figura 3.** Círculos en color naranja corresponden a ocurrencias georreferenciadas de *N. eatoni* en el Océano Austral (n=185). Registros obtenidos desde la base de datos GBIF, desde el Museo Nacional de Historia Natural de París y desde la Colección científica de la Universidad de Vigo, España.



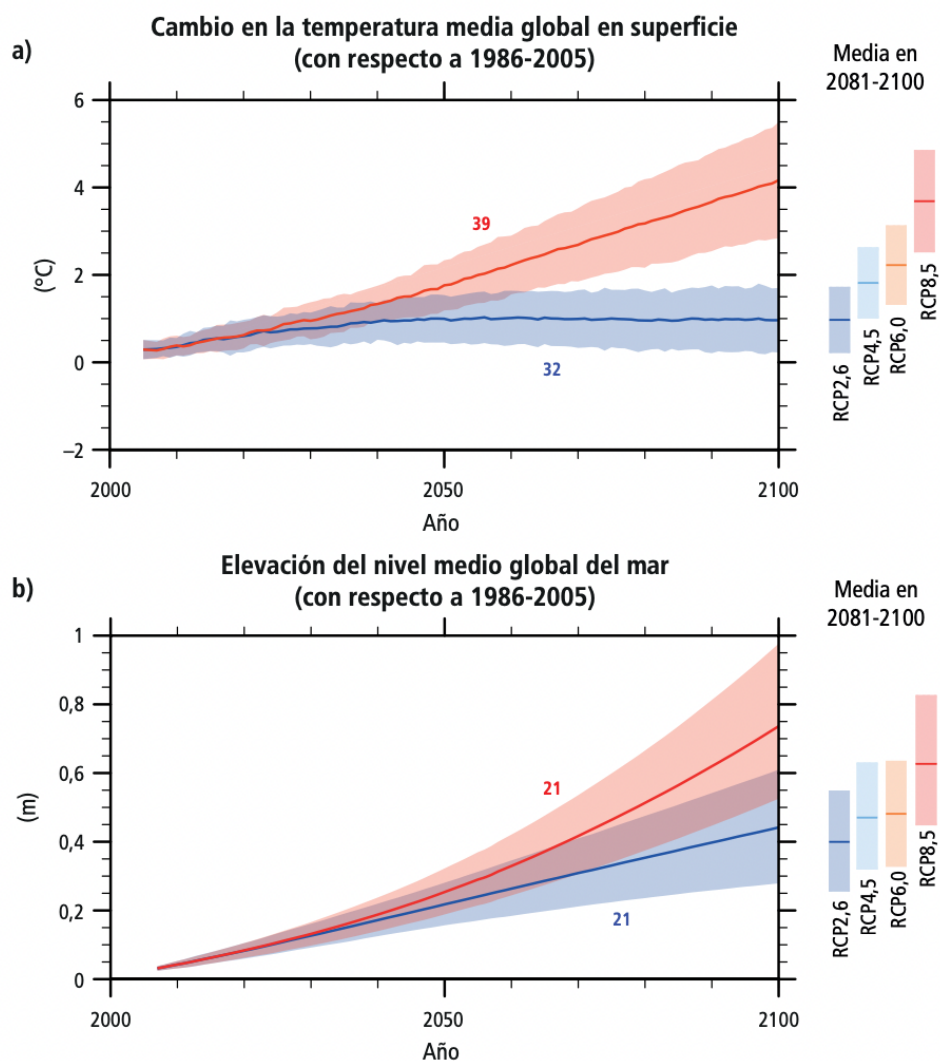
**Figura 4.** Patrón de cambio de presencia de *N. eatoni* en relación a latitud y profundidad. Ocurrencias georreferenciadas obtenidas desde la base de datos GBIF, Museo Nacional de Historia Natural de París y desde la Colección científica de la Universidad de Vigo, España. Son consideradas sólo aquellas ocurrencias que presentan profundidad de muestreo ( $n = 159$ ).

## 5.2. Trayectorias de Concentración Representativa (RCPs)

Para modelar las proyecciones de distribución futura de *Neobuccinum eatoni* en el Océano Austral, se utilizaron las Trayectorias de Concentración Representativa (RCPs) adoptadas por el IPCC en su Quinto Informe de Evaluación (AR5) de 2013. Estas RCPs corresponden a proyecciones teóricas de trayectorias de diferentes concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera y se caracterizan por un determinado Forzamiento Radiativo (FR), que es una medida de cómo el equilibrio del sistema atmosférico de la Tierra se altera debido a los cambios en la composición atmosférica como consecuencia de la actividad humana (IPCC, 2014a). Se expresa como una tasa de cambio en el flujo neto de energía

radiativa por unidad de área del planeta (medida en la parte superior de la atmósfera) en una razón de vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). Las proyecciones son cuatro y van desde un escenario de bajo FR futuro de  $2,6 W/m^2$  (RCP 2.6), hasta un FR muy alto de  $8,5 W/m^2$  (RCP8.5) para el año 2100 (IPCC, 2014b). Las trayectorias seleccionadas para este trabajo son RCP 4.5, en la que el FR se estabiliza en aproximadamente  $4,5 W/m^2$  después del 2100 y RCP 8.5 en que este valor será  $>8,5 W/m^2$  en 2100 y sigue aumentando durante un período de tiempo. Estas trayectorias reflejan respectivamente, escenarios climáticos donde los niveles de  $CO_2$  serán de 538 y 936 partes por millón (ppm) (Pörtner et al., 2014), conduciendo a un aumento de la temperatura media global en superficie de  $1,8 ^\circ C$  y  $3,7 ^\circ C$  para el período 2081-2100 (en relación al período 1986-2005) y a un aumento del nivel medio global del mar de 0,45 m y 0,63 m (IPCC, 2014a, 2014b) (Figura 5).

Las concentraciones de  $CO_2$  registradas en la atmósfera en los últimos años han ido en constante aumento, con medias anuales de 410 ppm en 2019, 418 ppm en 2022 y una media mensual en Abril de 2023 de 420 ppm de  $CO_2$  (Lan et al., 2023). Estos niveles reflejan que el escenario de menores concentraciones de  $CO_2$  (RCP 2.6 con 421 ppm) que plantea el AR5 del IPCC para 2100, en la actualidad ha sido superado, por lo que para efectos de esta investigación se considera un escenario futuro poco probable, lo que nos lleva a descartarlo en el uso de los modelos. Es así como se trabajó en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, los cuales representan moderadas (538 ppm) y muy altas (936 ppm) concentraciones de  $CO_2$  para 2100, siendo calificadas como proyecciones realistas para el futuro considerando que en 2023 las mediciones registran concentraciones de  $CO_2$  que rondan las 400 partes por millón (ppm).



**Figura 5.** Cambio proyectado en la temperatura media global en superficie (a) y elevación del nivel medio global del mar (b) de 2006 a 2100 en los distintos escenarios RCP que proyecta el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Fuente: IPCC (2014b).

### 5.3. Variables ambientales

Los datos ambientales seleccionados fueron aquellos disponibles tanto para el presente (promedios mensuales para el período 2000-2014) como para los escenarios de Trayectorias de Concentración Representativa de CO<sub>2</sub>: RCP 4.5 y RCP 8.5 (IPCC, 5<sup>th</sup>) para dos períodos futuros (2040-2050 y 2090-2100) (Assis et al., 2018). Fueron seleccionadas 48 capas ráster a escala mundial con una resolución espacial de 5 minutos de arco (0.08° o 9,2 km en el

ecuador) las cuales fueron recortadas al Océano Austral (-180°/+180°; -45°/-78°) con el propósito de evitar la sobre parametrización que pudiera generar la presencia de la región Ártica u otras áreas con características ambientales similares a la región Antártica. El set de descriptores oceanográficos incluye capas bentónicas para la profundidad media: temperatura, salinidad y velocidad de la corriente; capas para la superficie marina: temperatura, salinidad, velocidad de la corriente, espesor del hielo y clorofila-a. Cada variable cuenta con seis predictores distintos: el promedio a largo plazo, los registros mínimos y máximos, el promedio a largo plazo de los registros mínimos y máximos por año, y rango (Assis et al., 2018), obteniendo así 48 capas climáticas para el presente y para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, modelados para los años 2050 y 2100, todas descargadas desde la base de datos Bio-ORACLE v2.2 (Assis et al., 2018).

#### 5.4. Selección de variables ambientales

Previo a la ejecución de los modelos de distribución de especie, se realizó un análisis de correlación de Pearson con el propósito de filtrar las variables ambientales y eliminar aquellas con mayor correlación, debido a que la mayoría de los métodos estadísticos esperan que cada observación de un conjunto de datos sean totalmente independientes entre sí (Guisan et al., 2017). Fueron utilizadas las funciones *vifcor* y *vifstep* en el paquete *usdm en R* (Naimi, 2017) para seleccionar aquellas variables con un coeficiente de correlación de Pearson  $< 0.85$  (no correlacionadas) asignado al objeto *vifcor*, para luego crear objetos que posean valores VIFs  $< 10$ , creando un nuevo set de variables a utilizar en los modelos (Tabla 1) pero sin aquellas mayormente correlacionadas.

**Tabla 1.** Set de variables ambientales no correlacionadas, utilizadas para la ejecución de los modelos.

Descriptores ambientales	Descripción
<i>Capas bentónicas</i>	<i>Capas bentónicas para la profundidad media</i>
1. Velocidad de la corriente Lt. Min	Promedio a largo plazo de los registros mínimos de velocidad de la corriente
2. Velocidad de la corriente Min	Registro mínimo de la velocidad de la corriente

---

3. Velocidad de la corriente Rango	Promedio de la diferencia absoluta entre los registros mínimos y máximos por año, de la velocidad de la corriente
4. Salinidad Max	Registro máximo de salinidad
5. Salinidad Rango	Promedio de la diferencia absoluta entre los registros mínimos y máximos por año, de la salinidad
6. Temperatura Lt. Min	Promedio a largo plazo de los registros mínimos de temperatura
7. Temperatura Rango	Promedio de la diferencia absoluta entre los registros mínimos y máximos por año, de la temperatura
<i>Capas superficie marina</i>	
8. Clorofila-a Max	Registros máximos de clorofila
9. Clorofila-a Mean	Promedio a largo plazo de clorofila
10. Clorofila-a Min	Registro mínimo de clorofila
11. Velocidad de la corriente Lt. min	Promedio a largo plazo de los registros mínimos de velocidad de las corrientes
12. Velocidad de la corriente Min	Registro mínimo de la velocidad de la corriente
13. Velocidad de la corriente Rango	Promedio de la diferencia absoluta entre los registros mínimos y máximos por año, de la velocidad de la corriente
14. Espesor del hielo Lt. min	Promedio a largo plazo de los registros mínimos del espesor del hielo
15. Espesor del hielo Min	Registro mínimo del espesor del hielo
16. Salinidad Max	Registro máximo de salinidad
17. Salinidad Min	Registro mínimo de salinidad
18. Temperatura Lt. min	Promedio a largo plazo de los registros mínimos de temperatura
19. Temperatura Rango	Promedio de la diferencia absoluta entre los registros mínimos y máximos por año, de la temperatura

---

### 5.5. Modelos de Distribución de Especie (MDE)

A partir de 185 registros de ocurrencia de *Neobuccinum eatoni* y 19 variables ambientales no correlacionadas, se modeló la distribución potencial de la especie para el presente y luego se proyectó para los escenarios futuros, utilizando el paquete *Biomod2 en R Studio* (Thuiller et al., 2023). Se probaron 10 algoritmos y se realizaron 10 repeticiones de cada algoritmo para seleccionar los 3 más adecuados con el objetivo de disminuir la incertidumbre respecto al modelo, siendo los algoritmos Random Forest (RF), Gradient Boosting Machine (GBM) y Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) los que tenían mejor soporte estadístico. Para seleccionar los modelos más adecuados se utilizaron las métricas de evaluación True Skills Statistics (TSS) (Allouche et al., 2006) y Receiver Operating Characteristic (ROC) (Pearce & Ferrier, 2000). Con la función *BIOMOD\_EnsembleModeling* se combinaron las ejecuciones de los mejores modelos y se utilizó su mediana para generar el ensamblado con el fin de poder proyectar la distribución potencial de *N. eatoni* utilizando los algoritmos de modelos con mejor ajuste. Se realizaron las proyecciones de la distribución potencial para el presente y para escenarios climáticos futuros (2050 y 2100 para RCP 4.5 y RCP 8.5). Finalmente, se crearon mapas de proyección de probabilidad de presencia de *N. eatoni* para el presente y futuro utilizando el Sistema de Información Geográfica libre y de código abierto, QGIS v3.30 (<https://qgis.org/es/site/>).

## 6. RESULTADOS

Fueron seleccionadas aquellas variables no correlacionadas entre sí (Pearson < 0.85) determinando que el número de variables ambientales a considerar para la ejecución de los modelos pasa de 48 seleccionadas inicialmente a un total de 19 variables (Tabla 1). Se descartaron las variables correlacionadas (Pearson > 0.85) de capas bentónicas de la profundidad media: velocidad de la corriente (Lt. máx, máx y promedio), salinidad (Lt. máx, Lt. min, promedio, min) y temperatura (Lt. máx, máx, promedio, min). Para las capas de la superficie marina se descartó clorofila-a (Lt. máx, Lt. min, rango), velocidad de la corriente (Lt. máx, máx, promedio), espesor del hielo (Lt. máx, máx, promedio, rango), salinidad (Lt. máx, Lt. min, promedio, rango) y temperatura (Lt. máx, máx, promedio, min).

Los tres modelos seleccionados para generar el ensamblado mostraron valores elevados (>0.9) al ser analizados con ambas métricas de evaluación (ROC y TSS), lo que indica un buen rendimiento del modelado. La contribución de las variables ambientales a los tres modelos seleccionados fue máxima para la variable “Rango de salinidad del bentos”, contribuyendo en dos de tres casos en más del 50% a los MDEs (Tabla 2).

**Tabla 2.** Contribución de las variables ambientales a cada modelo según la media de las tres permutaciones realizadas para cada modelo.

Variable	Contribución al modelo		
	RF	GBM	MARS
<i><u>Bentos</u></i>			
Velocidad corriente Lt. Min	0.0035	0.0019	0.0542
Velocidad corriente Min	0.0028	0.0034	0.0068
Velocidad corriente Rango	0.0174	0.0114	0.1516
Salinidad Máx	0.0346	0.0103	0.0397
<b><i>Salinidad Rango</i></b>	<b><i>0.1642</i></b>	<b><i>0.8342</i></b>	<b><i>0.5911</i></b>
Temperatura Lt. Min	0.0896	0.0005	0.1663
Temperatura Rango	0.0852	0.0064	0
<i><u>Superficie marina</u></i>			
Clorofila-a Máx	0.03482	0.0131	0.2904
Clorofila-a Media	0.05494	0.0231	0

Clorofila-a Min	0.02532	0.0085	0.1802
Velocidad corriente Lt. Min	0.01820	0.0002	0.0595
Velocidad corriente Min	0.01761	0.0020	0
Velocidad corriente Rango	0.01772	0.0003	0.0803
Espesor de hielo Lt. Min	0.01020	0.0452	0.1582
Espesor de hielo Min	9.46667E-05	0.0002	0
Salinidad Máx	0.00993	0.0002	0
Salinidad Min	0.01258	0.0009	0
Temperatura Lt. Min	0.05994	0.2579	0
Temperatura Rango	0.01433	0.0023	0.0116

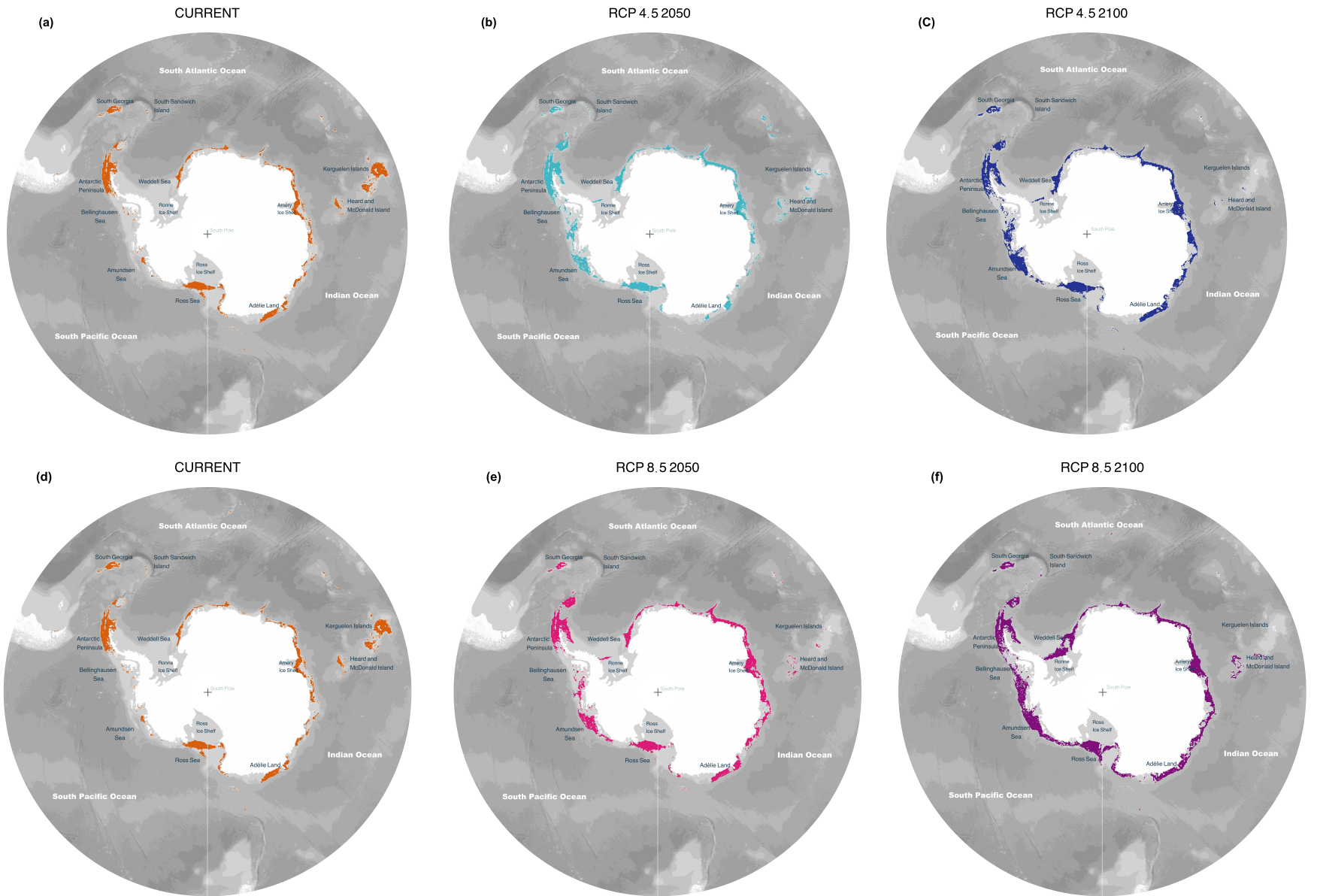
Basándonos en las ocurrencias georreferenciadas de la especie pudimos confirmar su amplia distribución circumpolar (Figura 3), destacando su definida presencia en profundidades menores a los 500 m (Figura 4). Fue posible proyectar la distribución potencial para el presente que comprende un área total de  $1.921.889 \text{ km}^2 \pm 17.823 \text{ km}^2$  (Figura 7) alrededor del continente Antártico y el archipiélago de Kerguelen e Islas Heard y McDonald. No obstante, el MDE identificó la existencia de otras áreas potenciales de distribución actual en función de las condiciones abióticas adecuadas, en el Atlántico Sur Oeste e Islas Georgia del sur (Figura 6a).

La proyección de distribución de *N. eatoni* para el futuro, bajo el escenario moderado (RCP 4.5) a corto plazo (año 2050), da cuenta que la especie se restringe a altas latitudes, disminuyendo su distribución en el Archipiélago de Kerguelen (Figura 6b) y aumentando alrededor de Antártica y principalmente en el sector Oeste del continente (Figura 6b), abarcando un área total de  $2.219.923 \text{ km}^2 \pm 36.367 \text{ km}^2$  (Figura 7). Destaca también un aumento en la probabilidad de presencia de la especie en el sector Este de la Península Antártica y en los mares de Bellingshausen y Amundsen. Para la región subantártica del archipiélago de Kerguelen, los resultados proyectan que la distribución disminuirá de manera considerable (~80%), con probabilidad de encontrar a la especie sólo en la región Sureste del Archipiélago (Figura 8a). De igual manera, para islas Heard y McDonald, se proyecta una reducción homogénea de área con probabilidad de presencia de la especie, alrededor de

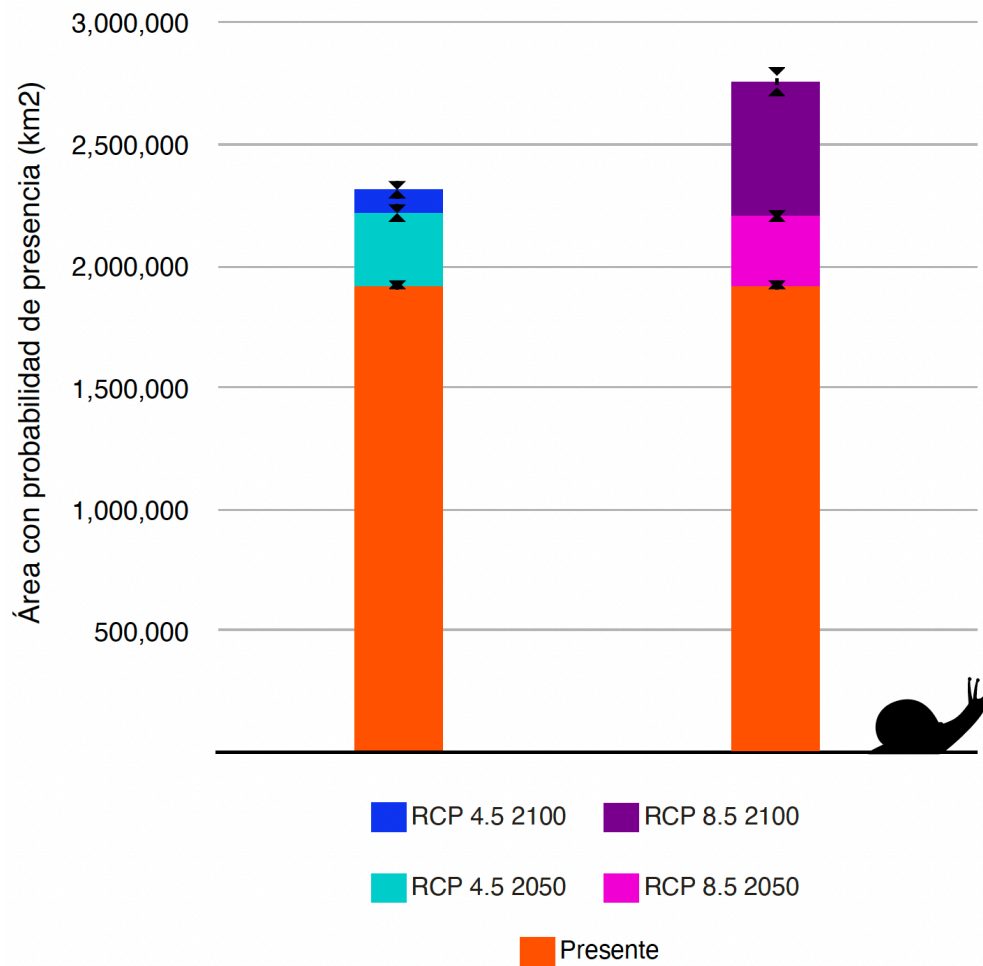
ambas islas (Figura 8a). En este mismo escenario, en el que se conduce a un nivel de forzamiento radiativo estabilizado, las proyecciones a largo plazo (año 2100) revelan mayor área donde será probable encontrar a la especie (Figura 7, área de  $2.311.920 \text{ km}^2 \pm 32.649 \text{ km}^2$ ), esto debido a que los modelos proyectan que *N. eatoni* aumentará su presencia alrededor del continente (Figura 6c), sin embargo, disminuye en un porcentaje cercano al 100% en islas Kerguelen, Heard y McDonald (Figura 8b) e islas Sandwich del Sur (Figura 6c).

Las proyecciones para el escenario RCP8.5, el cual sigue trayectorias de emisiones de CO<sub>2</sub> más altas, revelan una tendencia clara de aumento progresivo en relación al área que podría ocupar la especie. Para el año 2050 se proyecta que la especie aumente su área de presencia a  $2.204.950 \text{ km}^2 \pm 27.465 \text{ km}^2$  (Figura 7). El hábitat idóneo para la especie aumentaría alrededor del continente principalmente en la región Oeste, colonizando los sectores del mar de Amundsen, Bellinghausen, mar de Weddell y Este de Península Antártica (Figura 6e). Se proyecta en islas Orcadas del Sur un aumento importante del 50% relacionado al área donde será probable encontrar a la especie (Figura 6e). La reducción de hábitat idóneo se proyecta que afecte a la región más al norte de las islas subantárticas Sandwich del Sur, Kerguelen e islas Heard y McDonald (Figura 8c).

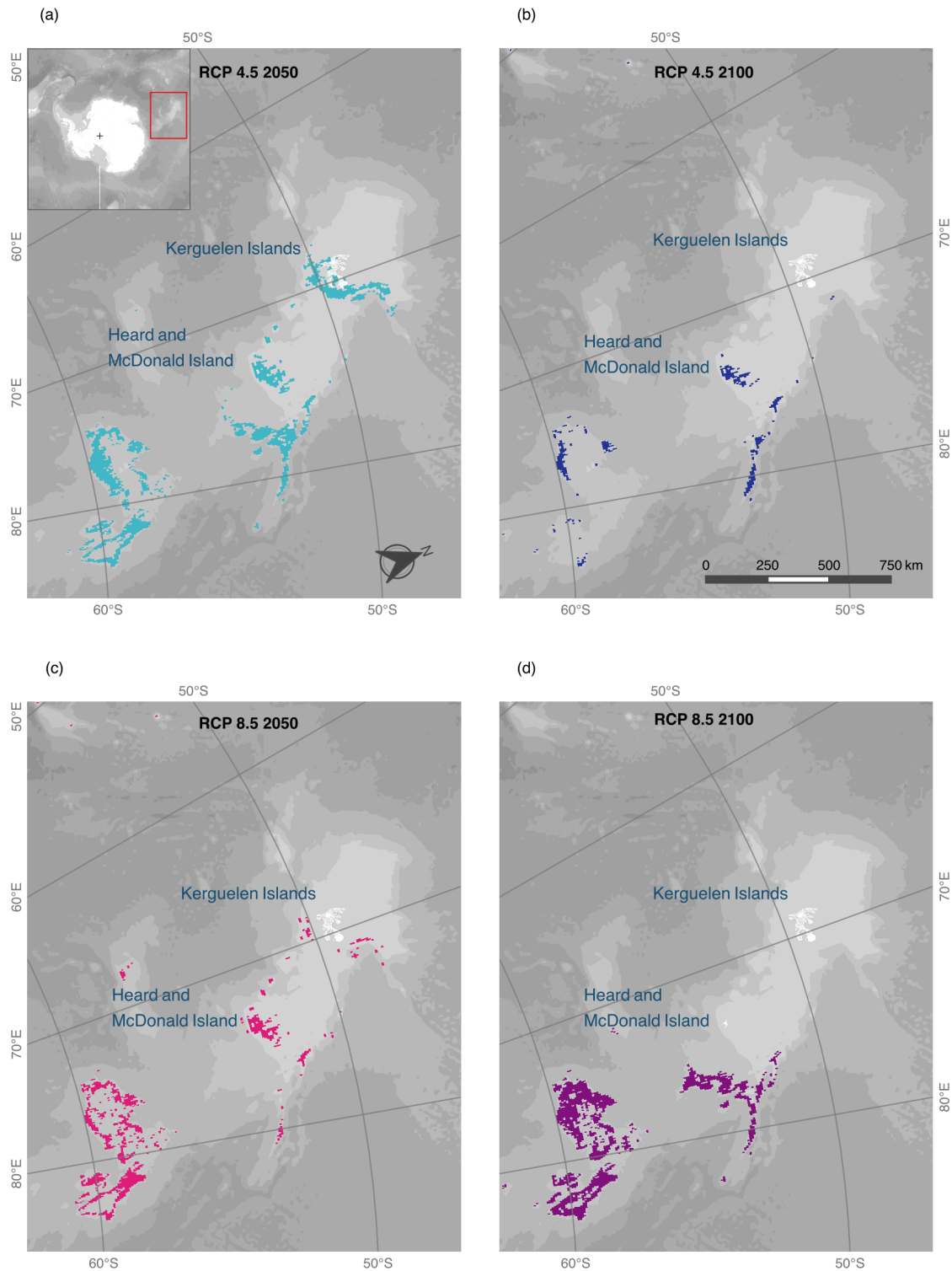
El MDE para RCP 8.5 para el año 2100 proyecta una persistencia de idoneidad de hábitat alrededor del continente Antártico, expandiéndose de manera considerable a los mares de Weddell, Bellinghausen y Amundsen (Figura 6f), abarcando un área de distribución total de  $2.759.062 \text{ km}^2 \pm 61.960 \text{ km}^2$  (Figura 7). En islas subantárticas la tendencia continúa, ya que el modelo proyecta que se reducirá en su totalidad el hábitat idóneo para *N. eatoni* en islas Kerguelen, Heard y McDonald (Figura 8d).



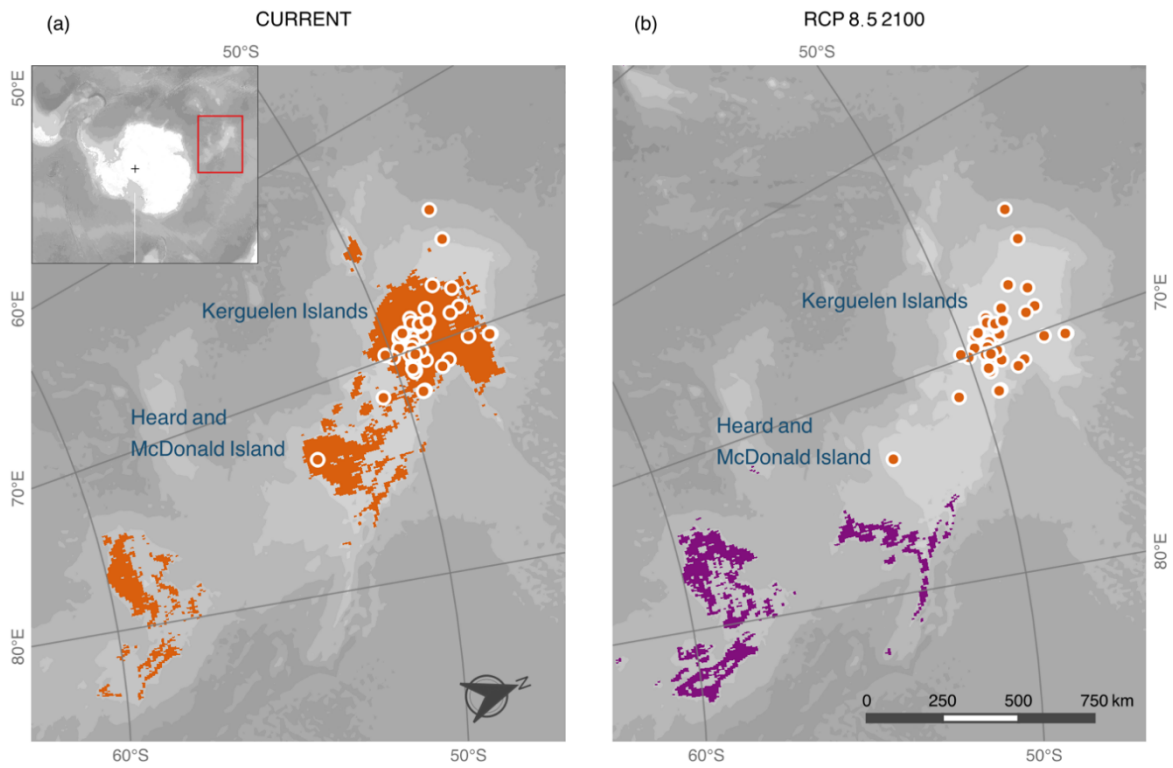
**Figura 6.** Proyección de la distribución potencial de *N. eatoni* para el presente (a, d) y para los años 2050 y 2100 basados en escenario RCP 4.5 (b, c) y RCP 8.5 (e, f) de cambio climático IPCC.



**Figura 7.** Área (km<sup>2</sup>) con probabilidad de presencia (y su desviación estándar) >70% de *N. eatoni* en el Océano Austral. Proyecciones para el presente y para los escenarios de simulación climática propuesta por el IPCC.



**Figura 8.** Región subantártica del Archipiélago de Kerguelen y áreas donde se proyecta >70% de probabilidad de presencia de *N. eatoni* en diversos escenarios de cambio climático del IPCC.



**Figura 9.** Comparación de la proyección de probabilidad de presencia (>70%) de *N. eatoni* en el Archipiélago de Kerguelen e Islas Heard y McDonald en el presente (a) y en escenario de cambio climático RCP 8.5 proyectado para el año 2100 (b). Círculos naranjos que representan a las ocurrencias georreferenciadas de *N. eatoni* se solapan a estas proyecciones.

## 7. DISCUSIÓN

Las expectativas generales sobre las respuestas biológicas al calentamiento de los océanos hablan de cambios de distribución de las especies hacia los polos (Pörtner et al., 2014) y de extinciones locales, eventos que se esperan sean comunes en la región subantártica (Cheung et al., 2009). La influencia de los escenarios de cambio climático del IPCC (IPCC, 5th) sobre la distribución potencial futura del gasterópodo endémico del Océano Austral *Neobuccinum eatoni*, obtenida combinando información histórica sobre la presencia de la especie en la región Antártica y subantártica con descriptores ambientales que caracterizan a las aguas al sur de los 45°S, apoyan la hipótesis de una reducción en las regiones septentrionales de su distribución actual.

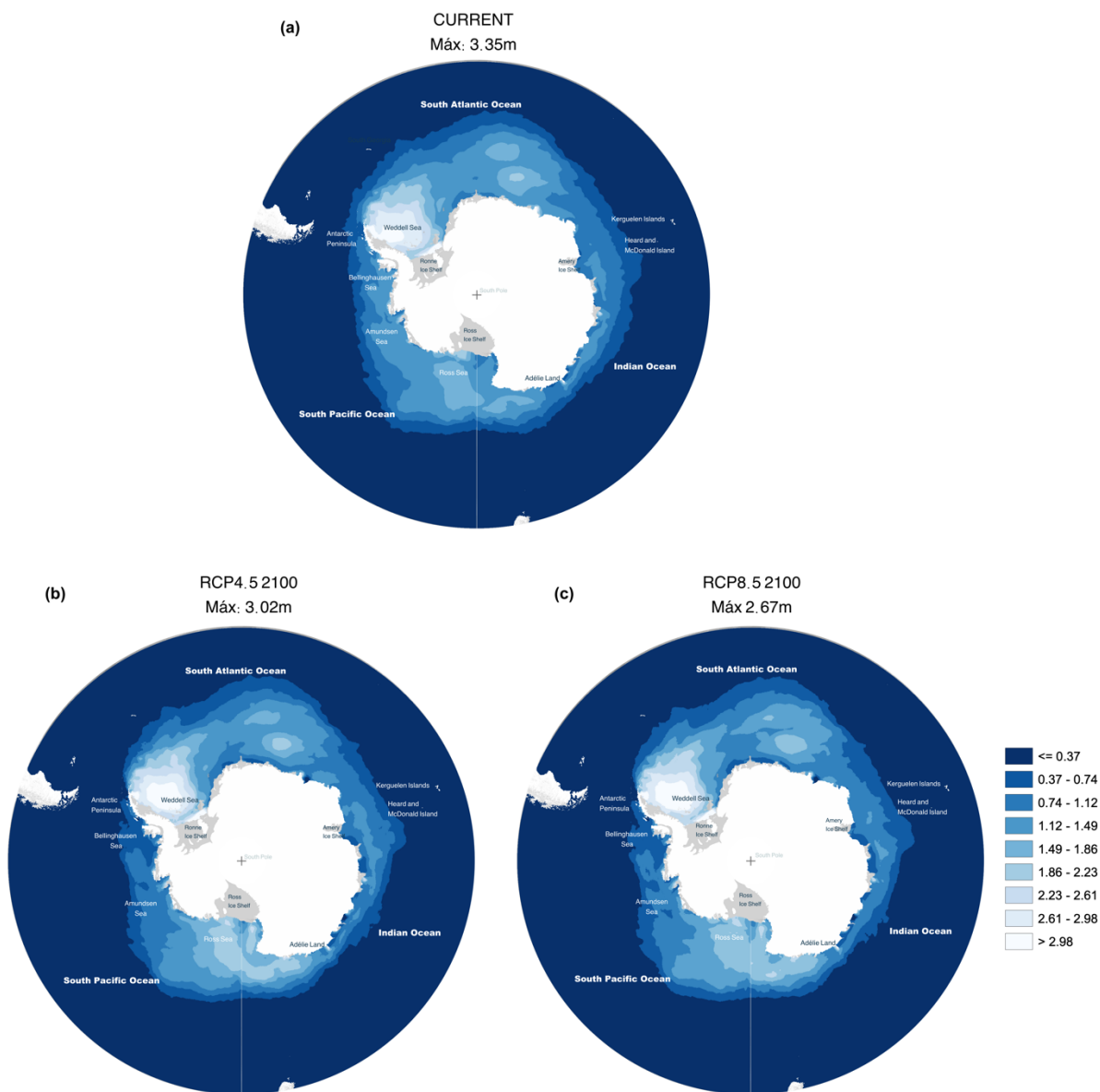
El MDE obtenido para la proyección de probabilidad de ocurrencia de *N. eatoni* en el presente, representa bien la distribución circumpolar descrita para la especie, la cual incluye la región subantártica del Archipiélago de Kerguelen e islas Heard y McDonald en el sector del Océano Índico, e islas Sandwich del Sur en el mar de Scotia en el sur del Océano Atlántico (Aldea & Troncoso, 2008; Fraussen, 2020; Schiaparelli et al., 2006). Aunque el modelo muestra probabilidad de presencia en un área acotada de ~2.700 km<sup>2</sup> fuera de su distribución, en la provincia de Tierra del Fuego de la Patagonia Argentina al Sur Oeste del Océano Atlántico. No obstante, esta probabilidad de presencia fuera de su distribución se debe a que el modelo detecta que las condiciones oceanográficas del lugar son potencialmente aptas para que la especie lo habite. Sin embargo, las barreras que aíslan al Océano Austral y su biota, como la CCA y el fuerte gradiente térmico que representa el Frente Polar Antártico (FPA) (Rogers et al., 2020; Thornhill et al., 2008), además de las profundas cuencas de más de 4000 m del Paso de Drake, impiden el paso de la fauna bentónica hacia latitudes más bajas (Gonzalez-Wevar et al., 2019) y la dispersión de organismos de la plataforma a lo largo del bentos (Shaw et al., 2004), incluso para aquellos que presentan euribatía (Brey et al., 1996) como es el caso de *N. eatoni*.

En cuanto a las proyecciones para la distribución potencial de *N. eatoni* en los escenarios climáticos futuros, ambos muestran que en general la especie se restringe a altas latitudes y amplía su distribución alrededor de Antártica. Bajo el escenario de estabilización (RCP 4.5)

la especie aumenta su área de probabilidad de presencia en un 15% para el año 2050 y 20% para 2100, aumento proyectado principalmente en el sector Oeste de Antártica con una expansión en el mar de Amundsen y en Península Antártica. La expansión particular en ambas regiones podría verse relacionada al fortalecimiento actual de los vientos del Oeste y las proyecciones de que estos aumentarían su velocidad en el futuro (Le Roux & McGeoch, 2008). Esto provocaría la acumulación de aguas profundas más cálidas en la plataforma, lo que sumado al calentamiento atmosférico ha provocado en la actualidad el adelgazamiento de aproximadamente el 75% de las plataformas de hielo de Península Antártica y el mar de Amundsen (Morley et al., 2020), lo cual en base a las capas ambientales utilizadas en esta investigación, se proyecta que sigan disminuyendo especialmente a largo plazo y en el sector Oeste de Antártica (Figura 10). Esta disminución de las plataformas de hielo a futuro abrirá nuevos hábitats bentónicos que se relacionarían a cambios en las áreas de distribución de especies bentónicas (Constable et al., 2022), pudiendo ser colonizadas por estas especies.

Para el escenario que representa concentraciones futuras muy elevadas de CO<sub>2</sub> (RCP 8.5), el modelo proyecta un aumento de probabilidad de presencia (comparado con las proyecciones para el presente) similar al escenario de estabilización (RCP 4.5), aumentando en un 14% para el año 2050. No obstante, para el año 2100 se observa un mayor incremento de esta probabilidad, alcanzando un 43%, lo que indica un considerable aumento de hábitat idóneo centrado de igual manera en Oeste de Antártica. Esta marcada diferencia entre el aumento de hábitat idóneo entre los dos escenarios RCP a largo plazo (2100) tienen relación con cambios significativos en la temperatura, la acidificación, la salinidad, los vientos y la extensión del hielo en el Océano Austral para 2100 (Meijers, 2014), los que serán más extremos en RCP 8.5 producto del rápido aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero que se proyectan para este escenario (Bracegirdle et al., 2013). Por ejemplo la temperatura en toda la columna de agua en este escenario de mayor FR, podría aumentar en promedio entre un 30% y un 60% más que bajo el escenario de estabilización (Sallée et al., 2013b), alcanzando un incremento de 3 °C principalmente en el océano superior (Sallée et al., 2013a) y hasta 0,3 °C en el agua de fondo (Heuzé et al., 2015). Las temperaturas en aumento hasta ahora han alterado los patrones de precipitación y provocado un aumento en la tasa de derretimiento de los glaciares (IPCC, 2013), lo que se podría ver intensificado a largo plazo

ante los cambios extremos que se proyectan en un escenario de altas emisiones. Esta disminución de las plataformas de hielo podría ser el factor que beneficie a *N. eatoni* ya que nuevos hábitats bentónicos quedarían disponibles para ser ocupados.



**Figura 10.** Espesor máximo de hielo (m) en el Océano Austral, para el período 2000-2014 (a), para el periodo 2090-2100 en RCP 4.5 (b) y RCP 8.5 (c).

Si bien las proyecciones para ambos escenarios de cambio climático dan cuenta de un probable éxito de *N. eatoni* al ampliar su distribución circumpolar, las proyecciones para las regiones más al norte de su distribución actual como son las Islas Kerguelen e Islas Heard y McDonald, son diferentes. En ambos escenarios el modelo predice que el área de probabilidad de presencia de la especie en el Archipiélago de Kerguelen disminuye considerablemente (hasta en un 99%, Figura 8d). A corto plazo (año 2050) bajo el escenario de estabilización (RCP 4.5) se proyecta una pérdida de hábitat al norte del Archipiélago (Figura 8a), mientras que para el año 2100 la probabilidad de presencia de la especie se reduce a una acotada área (7000 km<sup>2</sup>) alrededor de Islas Heard y McDonald (Figura 8b). Para el escenario RCP 8.5 la tendencia es similar, con probabilidad de presencia de la especie alrededor de Isla Heard y McDonald en el año 2050 (Figura 8c); para ausentarse por completo de Islas Kerguelen, Heard y McDonald en la proyección para el año 2100 (Figura 8d), evidenciando que los registros de ocurrencia que se utilizaron en esta investigación situados en la región subantártica, probablemente desaparezcan en este escenario futuro (Figura 9b). Estos resultados confirman la sensibilidad de la especie a las condiciones ambientales cambiantes de esta región. Por ejemplo, se proyectan aumentos de temperatura de 1.7 °C en el Archipiélago de Kerguelen en escenario RCP 8.5 (Arnould-Pétré et al., 2021) lo que podría afectar de manera directa a *N. eatoni* debido a que sería capaz de tolerar sólo pequeñas variaciones de temperatura (estenotermia). Lo anterior, sumado a su característica de gasterópodo incubador con ausencia de una etapa de dispersión larval, lo convierte en una especie vulnerable incapaz de adaptarse o migrar desde el Archipiélago de Kerguelen para colonizar otras zonas y encontrar un refugio climático. En tal situación, los cambios proyectados para las variaciones de temperatura y el rango de salinidad de las aguas cercanas al fondo marino, que a nivel de análisis estadístico en los modelos es la variable con mayor contribución, están más allá de los límites del nicho de la especie, lo que sugiere la posible extinción de *N. eatoni* a largo plazo en Islas Kerguelen, Heard y McDonald.

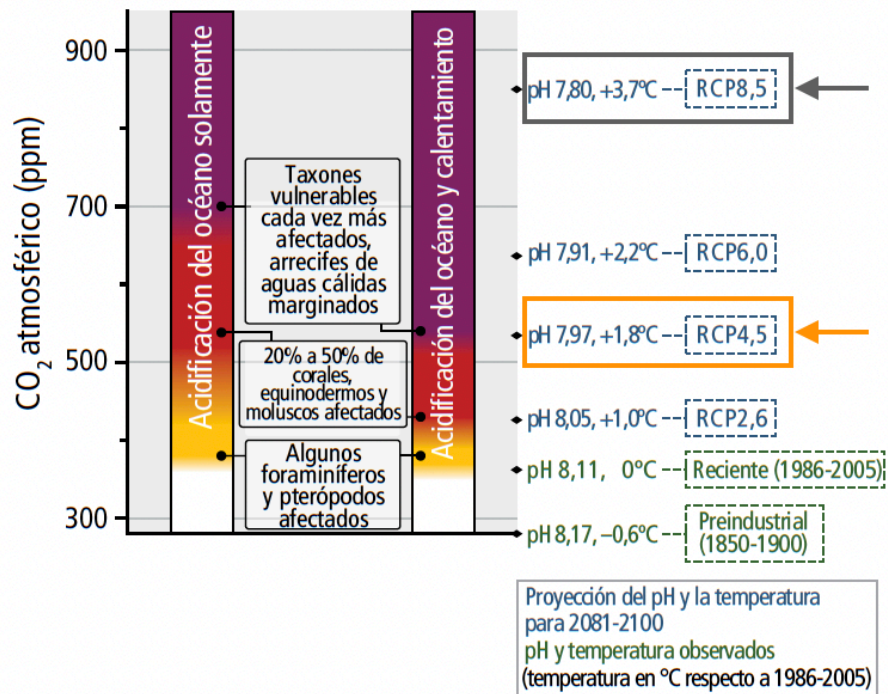
Existen estudios que respaldan la disminución de hábitat idóneo que se proyecta para *N. eatoni*, estos aplicados a especies de invertebrados bentónicos, equinodermos que comparten con nuestra especie los rangos de distribución latitudinal actual, el tipo de sustrato en que habitan y en ciertos casos el tipo de dieta. Por ejemplo Guillaumot et al. (2018) modela la distribución para el futuro (en RCP 8.5 para 2100) de cuatro especies de equinoideos

comunes en el Archipiélago de Kerguelen, de las cuales dos presentan rangos de distribución más amplios en el Océano Austral. Se observa que las respuestas geográficas de estas especies antes los cambios ambientales que se esperan para el futuro, varían entre desplazarse hacia los polos, reducción latitudinal o extinciones locales, las que estarían impulsadas por drásticos cambios en las temperaturas del fondo marino, los que impedirían que fauna endémica de la región siga habitando en el lugar.

Producto de la escasez de datos disponibles para condiciones futuras en el ambiente marino, Guillaumot et al. (2018) describe a la ejecución de modelos de distribución de especies en el Océano Austral como un desafío. En el océano existen variables distintas a las utilizadas para esta investigación que también podrían afectar la distribución de *N. eatoni* en ciertas regiones. Por ejemplo, el pH del Océano Austral es una variable de particular importancia para la biota marina calcificadora ya que su disminución en el océano puede generar un impacto negativo desafiando su crecimiento y el mantenimiento de sus estructuras de carbonato de calcio (Poloczanska et al., 2016), que les brindan protección contra depredadores, parásitos y también pueden proporcionar regulación de la temperatura (Vermeij, 1995). Desde el comienzo de la era industrial, la incorporación de CO<sub>2</sub> en los océanos ha dado lugar a que el pH superficial disminuya en 0,1, lo que corresponde a un 26% de aumento de la acidez (IPCC, 2014b). Las proyecciones apuntan a una mayor acidificación global de los océanos para ambos escenarios RCP utilizados en esta investigación, situando la disminución del pH para fines de siglo en el rango de 0,14 a 0,15 (aumento de la acidez del 38% al 41%) para RCP 4.5 y de 0,30 a 0,32 (del 100% al 109%) para RCP 8.5 (Figura 11) (IPCC, 2014b).

Los efectos de la acidificación oceánica particularmente en moluscos, implican reducción significativa de la calcificación, crecimiento y desarrollo, además de la alta sensibilidad que presentan larvas y juveniles de este grupo, lo que puede representar una disminución en sus poblaciones (Kroeker et al., 2013). Si bien *N. eatoni* carece de una etapa de dispersión larval en su ciclo de vida y cuenta con una metamorfosis intracapsular (Hain & Arnaud, 1992), se ha demostrado que los embriones de moluscos que presentan un modo de desarrollo directo en cápsulas de huevos bentónicos, por ejemplo el gasterópodo *Littorina obtusata*, muestran claros efectos al ser expuestos a pH reducido (pH 7.6), tales como la disminución del porcentaje de viabilidad, aumento significativo del tiempo de desarrollo de los embriones y

una clara reducción de la locomoción (Ellis et al., 2009). Esto demuestra la vulnerabilidad de las cápsulas de huevo que producen los gasterópodos, a condiciones de acidificación en los océanos (Gibson et al., 2011).



**Figura 11.** Cambios en el pH del océano superficial en los distintos escenarios RCP. Se destacan los escenarios de importancia para este estudio. Alta sensibilidad a la acidificación del océano en los moluscos que desarrollan estructuras de carbonato de calcio. Adaptado de IPCC (2014b).

Se identificó que la variable “Rango de salinidad del bentos” es la única variable ambiental que influye con una contribución mayor al 50% en la distribución proyectada de la especie (Tabla 2). El Rango es un predictor que representa el promedio de aquellas diferencias absolutas entre los registros de salinidad mínimos y máximos por cada año (Assis et al., 2018). Para el período del presente (2000-2014) este predictor alcanza un valor máximo de 1,47 PSU, mientras que en el escenario de concentración de gases de efecto invernadero moderado (RCP 4.5) para los dos periodos futuros evaluados (2040-2050 y 2090-2100), alcanza valores de 2,67 PSU y 2,30 PSU respectivamente. En el caso del escenario de alta

concentración de gases de efecto invernadero (RCP 8.5) este valor de rango es similar para el periodo 2040-2050 (2.54 PSU), sin embargo, para el periodo 2090-2100 el valor de rango aumenta a 3.49 PSU. El mayor aumento de este predictor a largo plazo en RCP 8.5 tiene una clara relación con el mayor derretimiento de las plataformas de hielo que son descritas en las variables ambientales utilizadas en este trabajo, principalmente en Oeste de la Península Antártica (Figura 10c).

## 8. CONCLUSIONES

El Océano Austral será impactado de manera significativa por el cambio climático que se proyecta ocurra a corto y largo plazo. En este contexto, la influencia de los escenarios de cambio climáticos del IPCC sobre la distribución potencial futura de *Neobuccinum eatoni*, apoyan la hipótesis de una reducción de la probabilidad de presencia de la especie, en las regiones más septentrionales de su distribución actual. Los MDE utilizados en esta investigación dan cuenta de que el Archipiélago de Kerguelen será la región que sufra los mayores cambios ambientales, perdiendo su calidad de hábitat idóneo para *N. eatoni*. Esto, se vería impulsado principalmente por el aumento del rango de salinidad de las aguas cercanas al fondo del océano, consecuencia de la intensificación que se proyecta en el ciclo estacional del hielo marino. Este rango de salinidad en aumento da cuenta de la pérdida de estabilidad del ambiente que caracteriza al continente Antártico y al Océano Austral, lo que directamente influye en la fisiología de organismos principalmente endémicos, adaptados a estas condiciones estables. Además, el importante aumento de temperatura que se prevé para esta región sería un factor adicional que influiría en la pérdida de su calidad de hábitat, afectando de manera directa a las especies endémicas que presentan estenotermia.

Los hallazgos aquí descritos son relevantes ya que permiten prever futuros cambios en la biogeografía de una región del Océano Austral como es el Archipiélago de Kerguelen, que presenta una importante diversidad de especies bentónicas, muchas de ellas endémicas y con características que las hacen vulnerables ante los cambios ambientales proyectados.

## REFERENCIAS

- Ahmed, M. (2020). Introduction to Modern Climate Change. Andrew E. Dessler: Cambridge University Press, 2011, 252 pp, ISBN-10: 0521173159. *Science of The Total Environment*, 734, 139397. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139397>
- Aldea, C., & Troncoso, J. S. (2008). Systematics and distribution of shelled molluscs (Gastropoda, Bivalvia and Scaphopoda) from the South Shetland Islands to the Bellingshausen Sea, West Antarctica. *Iberus*, 26(2), 43-117.
- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43(6), 1223-1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>
- Arnould-Pétré, M., Guillaumot, C., Danis, B., Féral, J.-P., & Saucède, T. (2021). Individual-based model of population dynamics in a sea urchin of the Kerguelen Plateau (Southern Ocean), *Abatus cordatus*, under changing environmental conditions. *Ecological Modelling*, 440, 109352. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109352>
- Assis, J., Tyberghein, L., Bosch, S., Verbruggen, H., Serrao, E. A., & De Clerck, O. (2018). Bio-ORACLE v2.0: Extending marine data layers for bioclimatic modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 27(3), 277-284. <https://doi.org/10.1111/geb.12693>
- Avsa. (2009). Conveyor belt. Descargado de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Conveyor\\_belt.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Conveyor_belt.svg) (Wikimedia Commons; recuperado el 6 de Junio, 2023.).
- Ballard, G., Jongsomjit, D., Veloz, S. D., & Ainley, D. G. (2012). Coexistence of mesopredators in an intact polar ocean ecosystem: the basis for defining a Ross Sea marine protected area. *Biological Conservation*, 156, 72-82.
- Bandh, S. A., Shafí, S., Peerzada, M., Rehman, T., Bashir, S., Wani, S. A., & Dar, R. (2021). Multidimensional analysis of global climate change: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(20), 24872-24888. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13139-7>
- Barnes, D., Griffiths, H., & Kaiser, S. (2009). Geographic range shift responses to climate change by Antarctic benthos: where we should look. *Marine Ecology Progress Series*, 393, 13-26. <https://doi.org/10.3354/meps08246>
- Barnes, D., & Peck, L. (2008). Vulnerability of Antarctic shelf biodiversity to predicted regional warming. *Climate Research*, 37(2-3), 149-163. <https://doi.org/10.3354/cr00760>
- Beck, J., Böller, M., Erhardt, A., & Schwanghart, W. (2014). Spatial bias in the GBIF database and its effect on modeling species' geographic distributions. *Ecological Informatics*, 19, 10-15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2013.11.002>
- Bracegirdle, T. J., Shuckburgh, E., Sallee, J.-B., Wang, Z., Meijers, A. J. S., Bruneau, N., Phillips, T., & Wilcox, L. J. (2013). Assessment of surface winds over the Atlantic, Indian, and Pacific Ocean sectors of the Southern Ocean in CMIP5 models: historical bias, forcing response, and state dependence. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(2), 547-562. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50153>

- Brey, T., Dahm, C., Gorny, M., Klages, M., Stiller, M., & Arntz, W. E. (1996). Do Antarctic benthic invertebrates show an extended level of eurybathy? *Antarctic Science*, 8(1), 3-6. <https://doi.org/10.1017/s0954102096000028>
- Canadell, J. G., & Jackson, R. B. (2021). *Ecosystem collapse and climate change*. Springer International Publishing
- Cavanagh, R. D., Trathan, P. N., Hill, S. L., Melbourne-Thomas, J., Meredith, M. P., Hollyman, P., Krafft, B. A., Muelbert, M. M., Murphy, E. J., & Sommerkorn, M. (2021). Utilising IPCC assessments to support the ecosystem approach to fisheries management within a warming Southern Ocean. *Marine Policy*, 131, 104589.
- Cheung, W. W. L. (2018). The future of fishes and fisheries in the changing oceans. *Journal of Fish Biology*, 92(3), 790-803. <https://doi.org/10.1111/jfb.13558>
- Cheung, W. W. L., Lam, V. W. Y., Sarmiento, J. L., Kearney, K., Watson, R., & Pauly, D. (2009). Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish and Fisheries*, 10(3), 235-251. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2008.00315.x>
- Clarke, A., Griffiths, H. J., Linse, K., Barnes, D. K. A., & Crame, J. A. (2007). How well do we know the Antarctic marine fauna? A preliminary study of macroecological and biogeographical patterns in Southern Ocean gastropod and bivalve molluscs. *Diversity and Distributions*, 13(5), 620-632. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2007.00380.x>
- Constable, A. J., Harper, S., Dawson, J., Holsman, K., Mustonen, T., Piepenburg, D., & Rost, B. (2022). : *Cross-Chapter Paper 6: Polar Regions*. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. (Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Issue.
- Constantin, A., & Johnson, R. S. (2016). An Exact, Steady, Purely Azimuthal Flow as a Model for the Antarctic Circumpolar Current. *Journal of Physical Oceanography*, 46(12), 3585-3594. <https://doi.org/10.1175/jpo-d-16-0121.1>
- Convey, P., Bindschadler, R., Di Prisco, G., Fahrbach, E., Gutt, J., Hodgson, D. A., Mayewski, P. A., Summerhayes, C. P., & Turner, J. (2009). Antarctic climate change and the environment. *Antarctic Science*, 21(6), 541-563. <https://doi.org/10.1017/s0954102009990642>
- Convey, P., & Peck, L. S. (2019). Antarctic environmental change and biological responses. *Science Advances*, 5(11), eaaz0888. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz0888>
- Cooley, S., Schoeman, D., Bopp, L., Boyd, P., Donner, S., Ghebrehiwet, D. Y., Ito, S.-I., Kiessling, W., Martinetto, P., Ojea, E., Racault, M.-F., Rost, B., & Skern-Mauritzen, M. (2022). : *Oceans and Coastal Ecosystems and Their Services*. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. (Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Issue.
- Crame, J. A. (2018). Key stages in the evolution of the Antarctic marine fauna. *Journal of Biogeography*, 45(5), 986-994. <https://doi.org/10.1111/jbi.13208>
- De Broyer, C., Koubbi, P., Griffiths, H., Raymond, B., d', U., Van de Putte, A., Danis, B., David, B., Grant, S., Gutt, J., Held, C., Hosie, G., Huettmann, F., Post, A., & Ropert-Coudert, Y. (2014). *Biogeographic Atlas of the Southern Ocean*.

- Ellis, R., Bersey, J., Rundle, S., Hall-Spencer, J., & Spicer, J. (2009). Subtle but significant effects of CO<sub>2</sub> acidified seawater on embryos of the intertidal snail, *Littorina obtusata*. *Aquatic Biology*, 5, 41-48. <https://doi.org/10.3354/ab00118>
- Fox-Kemper, B., H. T. H., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L., Golledge, N. R., Hemer, M., Kopp, R. E., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., Nowicki, S., Nurhati, I. S., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Slangen, A. B. A., & Yu, Y. (2021). Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.*, pp. 1211–1362. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>
- Fraussen, K. (2020). *Neobuccinum eatoni* (E. A. Smith, 1875), a magical shell from an icy place. *Pallidula*, 50(1), 12-14.
- Freer, J. J., Tarling, G. A., Collins, M. A., Partridge, J. C., & Genner, M. J. (2019). Predicting future distributions of lanternfish, a significant ecological resource within the Southern Ocean. *Diversity and Distributions*, 25(8), 1259-1272.
- Gibson, R., Atkinson, R., Gordon, J., Smith, I., & Hughes, D. (2011). Impact of ocean warming and ocean acidification on marine invertebrate life history stages: vulnerabilities and potential for persistence in a changing ocean. *Oceanogr Mar Biol Annu Rev*, 49, 1-42.
- Gonzalez-Wevar, C. A., Gerard, K., Rosenfeld, S., Saucedo, T., Naretto, J., Diaz, A., Morley, S. A., Brickle, P., & Poulin, E. (2019). Cryptic speciation in Southern Ocean *Aequiyoldia eightsii* (Jay, 1839): Mio-Pliocene trans-Drake Passage separation and diversification. *Progress in Oceanography*, 174, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.09.004>
- Griffiths, H. J. (2010). Antarctic Marine Biodiversity – What Do We Know About the Distribution of Life in the Southern Ocean? *PLoS ONE*, 5(8), e11683. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011683>
- Griffiths, H. J., Barnes, D. K. A., & Linse, K. (2009). Towards a generalized biogeography of the Southern Ocean benthos. *Journal of Biogeography*, 36(1), 162-177. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2008.01979.x>
- Gruber, N. (2011). Warming up, turning sour, losing breath: ocean biogeochemistry under global change. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 369(1943), 1980-1996. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0003>
- Guillaumot, C., Danis, B., & Saucède, T. (2020). Selecting environmental descriptors is critical for modelling the distribution of Antarctic benthic species. *Polar Biology*, 43(9), 1363-1381. <https://doi.org/10.1007/s00300-020-02714-2>
- Guillaumot, C., Fabri-Ruiz, S., Martin, A., Eléaume, M., Danis, B., Féral, J.-P., & Saucède, T. (2018). Benthic species of the Kerguelen Plateau show contrasting distribution shifts in response to environmental changes. *Ecology and Evolution*, 8(12), 6210-6225. <https://doi.org/10.1002/ece3.4091>
- Guisan, A., Thuiller, W., & Zimmermann, N. E. (2017). Habitat Suitability and Distribution Models. <https://doi.org/10.1017/9781139028271>
- Gulev, S. K., Thorne, P. W., Ahn, J., Dentener, F. J., Domingues, C. M., Gerland, S., Gong, D., Kaufman, D. S., Nnamchi, H. C., Quaas, J., Rivera, J. A., Sathyendranath, S., Smith, S. L., Trewin, B., Schuckmann, K. v., & Vose, R. S. (2021). Changing State

- of the Climate System. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.*, pp. 287-422. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.004>
- Güller, M., Puccinelli, E., & Zelaya, D. G. (2020). The Antarctic Circumpolar Current as a dispersive agent in the Southern Ocean: evidence from bivalves. *Marine Biology*, 167(10). <https://doi.org/10.1007/s00227-020-03746-2>
- Gutt, J., Bertler, N., Bracegirdle, T. J., Buschmann, A., Comiso, J., Hosie, G., Isla, E., Schloss, I. R., Smith, C. R., Tournadre, J., & Xavier, J. C. (2015). The Southern Ocean ecosystem under multiple climate change stresses - an integrated circumpolar assessment. *Global Change Biology*, 21(4), 1434-1453. <https://doi.org/10.1111/gcb.12794>
- Hain, S., & Arnaud, P. M. (1992). Notes on the reproduction of high-Antarctic molluscs from the Weddell Sea. *Polar Biology*, 12, 303-312.
- Harasewych, M. G., Kantor, Y. I., & Linse, K. (2000). Parabuccinum, a new genus of Magellanic buccinulid (Gastropoda: Neogastropoda), with a description of a new species. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 113(2), 542-560.
- Heuzé, C., Heywood, K. J., Stevens, D. P., & Ridley, J. K. (2015). Changes in Global Ocean Bottom Properties and Volume Transports in CMIP5 Models under Climate Change Scenarios\*. *Journal of Climate*, 28(8), 2917-2944. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00381.1>
- Hutchinson, G. (1957). Concluding remarks—cold spring harbor symposia on quantitative biology. Reprinted in 1991: classics in theoretical biology. *Bulletin of Mathematical Biology*, 53(1507), 193-213.
- IPCC. (2014a). *Anexo II: Glosario. En: 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.*
- IPCC. (2014b). *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.*
- IPCC, A. (2013). Climate change 2013: the physical science basis. *Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, 1535.
- Jerosch, K., Scharf, F. K., Deregibus, D., Campana, G. L., Zacher, K., Pehlke, H., Falk, U., Hass, H. C., Quartino, M. L., & Abele, D. (2019). Ensemble modeling of Antarctic macroalgal habitats exposed to glacial melt in a polar fjord. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, 207.
- Kato, Y. (2020). Diatom-based reconstruction of the Subantarctic Front migrations during the late Miocene and Pliocene. *Marine Micropaleontology*, 160, 101908. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2020.101908>
- Kroeker, K. J., Kordas, R. L., Crim, R., Hendriks, I. E., Ramajo, L., Singh, G. S., Duarte, C. M., & Gattuso, J. P. (2013). Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global Change Biology*, 19(6), 1884-1896. <https://doi.org/10.1111/gcb.12179>

- Lan, X., Tans, P., & Thoning, K. W. (2023). *Trends in globally-averaged CO2 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2023-07* <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>.
- Le Roux, P. C., & McGeoch, M. A. (2008). Changes in climate extremes, variability and signature on sub-Antarctic Marion Island. *Climatic Change*, 86(3-4), 309-329. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9259-y>
- McGill, B. J. (2010). Matters of scale. *Science*, 328(5978), 575-576.
- Meijers, A. J. S. (2014). The Southern Ocean in the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 372(2019), 20130296. <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0296>
- Mélice, J. L., Lutjeharms, J. R. E., Rouault, M., & Ansoorge, I. (2003). Sea-surface temperatures at the sub-Antarctic islands Marion and Gough during the past 50 years. *South African Journal of Science*, 99, 363-366.
- Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Brooks, T. M., Pilgrim, J. D., Konstant, W. R., Da Fonseca, G. A. B., & Kormos, C. (2003). Wilderness and biodiversity conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(18), 10309-10313. <https://doi.org/10.1073/pnas.1732458100>
- Moore, J. K., Abbott, M. R., & Richman, J. G. (1999). Location and dynamics of the Antarctic Polar Front from satellite sea surface temperature data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C2), 3059-3073. <https://doi.org/10.1029/1998jc900032>
- Morley, S. A., Abele, D., Barnes, D. K. A., Cárdenas, C. A., Cotté, C., Gutt, J., Henley, S. F., Höfer, J., Hughes, K. A., Martin, S. M., Moffat, C., Raphael, M., Stammerjohn, S. E., Suckling, C. C., Tulloch, V. J. D., Waller, C. L., & Constable, A. J. (2020). Global Drivers on Southern Ocean Ecosystems: Changing Physical Environments and Anthropogenic Pressures in an Earth System [Review]. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.547188>
- Murphy, E. J., Johnston, N. M., Hofmann, E. E., Phillips, R. A., Jackson, J. A., Constable, A. J., Henley, S. F., Melbourne-Thomas, J., Trebilco, R., & Cavanagh, R. D. (2021). Global connectivity of Southern Ocean ecosystems. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 454.
- Nachtsheim, D. A., Jerosch, K., Hagen, W., Plötz, J., & Bornemann, H. (2017). Habitat modelling of crabeater seals (*Lobodon carcinophaga*) in the Weddell Sea using the multivariate approach Maxent. *Polar Biology*, 40, 961-976.
- Naimi, B. (2017). R package, usdm: Uncertainty Analysis for Species Distribution Models 2017. <https://CRAN.R-project.org/package=usdm>
- Norkko, A., Thrush, S. F., Cummings, V. J., Gibbs, M. M., Andrew, N. L., Norkko, J., & Schwarz, A. M. (2007). Trophic structure of coastal Antarctic food webs associated with changes in sea ice and food supply. *Ecology*, 88(11), 2810-2820. <https://doi.org/10.1890/06-1396.1>
- Pearce, J., & Ferrier, S. (2000). Evaluating the predictive performance of habitat models developed using logistic regression. *Ecological Modelling*, 133(3), 225-245. [https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(00\)00322-7](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(00)00322-7)

- Pearson, R. G., & Dawson, T. P. (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. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822x.2003.00042.x>
- Peck, L. S. (2018). Antarctic marine biodiversity: adaptations, environments and responses to change. *Oceanography and Marine Biology*.
- Pianka, E. R. (1966). Latitudinal gradients in species diversity: a review of concepts. *The American Naturalist*, 100(910), 33-46.
- Poloczanska, E. S., Burrows, M. T., Brown, C. J., García Molinos, J., Halpern, B. S., Hoegh-Guldberg, O., Kappel, C. V., Moore, P. J., Richardson, A. J., Schoeman, D. S., & Sydeman, W. J. (2016). Responses of Marine Organisms to Climate Change across Oceans. *Frontiers in Marine Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00062>
- Pörtner, H.-O., Karl, D. M., Boyd, P. W., Cheung, W. W. L., Lluich-Cota, S. E., Nojiri, Y., Schmidt, D. N., & Zavialov, P. O. (2014). : *Ocean systems. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Issue.
- Rogers, A. D., Frinault, B. A. V., Barnes, D. K. A., Bindoff, N. L., Downie, R., Ducklow, H. W., Friedlaender, A. S., Hart, T., Hill, S. L., Hofmann, E. E., Linse, K., McMahon, C. R., Murphy, E. J., Pakhomov, E. A., Reygondeau, G., Staniland, I. J., Wolf-Gladrow, D. A., & Wright, R. M. (2020). Antarctic Futures: An Assessment of Climate-Driven Changes in Ecosystem Structure, Function, and Service Provisioning in the Southern Ocean. *Annual Review of Marine Science*, 12(1), 87-120. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010419-011028>
- Sallée, J. B., Shuckburgh, E., Bruneau, N., Meijers, A. J. S., Bracegirdle, T. J., & Wang, Z. (2013a). Assessment of Southern Ocean mixed-layer depths in CMIP5 models: Historical bias and forcing response. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(4), 1845-1862. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20157>
- Sallée, J. B., Shuckburgh, E., Bruneau, N., Meijers, A. J. S., Bracegirdle, T. J., Wang, Z., & Roy, T. (2013b). Assessment of Southern Ocean water mass circulation and characteristics in CMIP5 models: Historical bias and forcing response. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(4), 1830-1844.
- Saucède, T., Guillaumot, C., Michel, L. N., Fabri-Ruiz, S., Bazin, A., Cabessut, M., García-Berro, A., Mateos, A., Mathieu, O., De Ridder, C., Dubois, P., Danis, B., David, B., Díaz, A., Lepoint, G., Motreuil, S., Poulin, E., & Féral, J.-P. (2019). Modelling species response to climate change in sub Antarctic islands: echinoids as a case study for the Kerguelen Plateau. *The Kerguelen Plateau: Marine Ecosystem and Fisheries. Proceedings of the Second Symposium*, 95-116.
- Schiaparelli, S., Lörz, A.-N., & Cattaneo-Vietti, R. (2006). Diversity and distribution of mollusc assemblages on the Victoria Land coast and the Balleny Islands, Ross Sea, Antarctica. *Antarctic Science*, 18(4), 615-631. <https://doi.org/10.1017/s0954102006000654>
- Schories, D., & Kohlberg, G. (2016). *Marine Wildlife King George Island Antarctica*.
- Shaw, P. W., Arkhipkin, A. I., & Al-Khairulla, H. (2004). Genetic structuring of Patagonian toothfish populations in the Southwest Atlantic Ocean: the effect of the Antarctic

- Polar Front and deep-water troughs as barriers to genetic exchange. *Molecular Ecology*, 13(11), 3293-3303. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.2004.02327.x>
- Thornhill, D. J., Mahon, A. R., Norenburg, J. L., & Halanych, K. M. (2008). Open-ocean barriers to dispersal: a test case with the Antarctic Polar Front and the ribbon worm *Parborlasia corrugatus* (Nemertea: Lineidae). *Molecular Ecology*, 17(23), 5104-5117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.2008.03970.x>
- Thuiller, W., Georges, D., Engler, R., Breiner, F., Georges, M. D., & Thuiller, C. W. (2023). Package 'biomod2'. Ensemble Platform for Species Distribution Modeling. <https://CRAN.R-project.org/package=biomod2>
- Vermeij, G. J. (1995). *A natural history of shells* (Vol. 15). Princeton University Press.