

Informe final publicable de proyecto

Impactos del cambio global sobre los ecosistemas antárticos: los pingüinos pygoscelidos como centinelas del Océano Austral

Código de proyecto ANII: FCE_1_2021_1_166587

Fecha de cierre de proyecto: 01/04/2025

SOUTULLO BUGALLO, Alvaro (Responsable Técnico - Científico)

GOBEL MAZZUCHELLI, Noelia Karen (Investigador)

ANGELIER, Frédéric (Investigador)

BARBOSA, Andres (Investigador)

JUÁRES, Mariana (Investigador)

KATO, Akiko (Investigador)

ROPERT-COUDERT, Yan (Investigador)

TEIXEIRA DE MELLO RAMIREZ RAMÍREZ, Franco Andrés (Investigador)

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL ESTE (Institución Proponente) \\ MUSEO NACIONAL DE CIENCIAS NATURALES (CSIC) \\
INSTITUTO ANTÁRTICO ARGENTINO (DNA) \\ CENTRE D'ETUDES BIOLOGIQUES DE CHIZÉ (CNRS/LA ROCHELLE UNIVERSITÉ) \\
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL ESTE

Resumen del proyecto

La Antártida y el océano que la rodea cumplen un rol fundamental en el sistema climático global, jugando un papel importante en el nivel medio del mar y los balances globales de calor y gases de efecto invernadero. El Océano Austral constituye además una de las principales reservas de alimento del planeta. La explotación de recursos marinos vivos en esta región está regulada por una convención (la CCRVMA), que tiene como objetivo principal la gestión racional del ecosistema marino a fin de permitir la utilización sostenida de sus recursos vivos, utilizando para eso un enfoque de gestión ecosistémica de pesquerías basado en evidencia científica. Sin embargo, esta región del planeta se encuentra fuertemente presionada por el cambio climático y el impacto de las actividades humanas. El sector oeste de la península antártica (PAO), es una de las áreas polares más afectadas por el calentamiento global. Como consecuencia, se ha registrado una disminución en la extensión y duración del hielo marino, teniendo una profunda incidencia sobre las especies dependientes del hielo, como el krill antártico (*Euphausia superba*), una especie clave en la red alimenticia antártica. Esta región también está sometida a una fuerte presión de la pesca, concentrando más del 90% de la captura total de krill que se realiza anualmente en el Océano Austral. En el ecosistema marino, los pingüinos son considerados especies centinelas, ya que responden a los cambios que ocurren en los niveles tróficos más bajos, reflejando de forma rápida los cambios ambientales en el medio marino. En la región de la PAO, los pingüinos del género *Pygoscelis* han mostrado cambios significativos pero divergentes en sus tendencias poblacionales como consecuencia de los procesos antes mencionados: mientras que los pingüinos de Adelia muestran tendencias negativas, los papúa están expandiéndose. La comparación en las respuestas de colonias de ambas especies expuestas a las mismas condiciones ambientales ofrece una oportunidad única para comprender el peso relativo que distintos componentes del cambio global pueden estar teniendo en las tendencias poblacionales observadas, y generar información relevante para el desarrollo de medidas efectivas de gestión del ecosistema marino en la PAO. En particular el ordenamiento de la actividad pesquera y la creación de Áreas Marinas Protegidas, actualmente en discusión en los ámbitos políticos de la CCRVMA.

Ciencias Naturales y Exactas / Ciencias de la Tierra y relacionadas con el Medio Ambiente / Ciencias Medioambientales (los aspectos sociales van en "Geografía Económica y Social" / Ecología y gestión ambiental

Palabras clave: áreas marinas protegidas / manejo ecosistémico / cambio climático /

Antecedentes, problema de investigación, objetivos y justificación.

La Antártida y el Océano Austral cumplen un rol fundamental en el sistema climático global, jugando un papel importante en el nivel medio del mar y los balances globales de calor y gases de efecto invernadero (Kennicutt et al. 2019). La Antártida es la principal reserva de agua dulce del planeta, y el Océano Austral constituye uno de los océanos más productivos del mundo. La Antártida ha sido declarada una reserva natural destinada a la paz y a la ciencia, y es gestionada bajo un régimen jurídico especial, el Tratado Antártico, no siendo parte del territorio nacional de ningún país. A su vez, el Océano Austral y los mares que rodean la Antártida, son gestionados a través de la Comisión para la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos (CCRVMA), que tiene como objetivo principal la gestión racional del ecosistema marino a fin de permitir la utilización sostenida de sus recursos vivos (CCAMLR, 2018).

Sin embargo, esta región del planeta se encuentra fuertemente presionada por el cambio climático y el impacto de las actividades humanas, que generan pérdida de diversidad biológica, introducción de especies exóticas, contaminación, sobreexplotación de recursos marinos y cambios físicoquímicos en el ecosistema marino (Chown y Brooks 2019; Ropert-Coudert et al. 2019; Morley et al. 2020; Rogers et al. 2020; Cavanagh et al. 2021). En particular, la península antártica (PA), y específicamente el sector oeste de esta región (PAO), es una de las áreas polares más afectadas por el calentamiento global (Cook et al. 2016; Siegert et al. 2019). Como consecuencia, se ha registrado una disminución en la extensión y duración del hielo marino (Stammerjohn et al. 2008; Moffat y Meredith 2018), teniendo una profunda incidencia sobre las especies dependientes del hielo, como el krill antártico (*Euphausia superba*) (Atkinson et al. 2019). Esta es una especie clave en la red alimenticia antártica, y por lo tanto su reducción está teniendo efectos en las poblaciones de sus predadores.

Esta región también está sometida a una fuerte presión de la pesca (Hogg et al. 2020). El krill antártico es el principal objetivo de la pesquería en el Océano Austral, y actualmente se encuentra concentrada en el área 48 de FAO (PAO y Arco de Scotia) (Kruger et al. 2020). Esta actividad ha crecido en las últimas décadas, llegando a capturar casi 400.000 toneladas de krill en 2019, correspondiendo el 90% a la PA (Hogg et al. 2020). Hasta el momento, el límite de captura establecido por la CCRVMA para el área 48 es de 620.000 toneladas.

Por otro lado, desde el año 2002 la CCRVMA ha estado trabajando en la creación de una red de Áreas Marinas Protegidas (AMPs) en el Océano Austral (Brooks 2013, Sylvester y Brooks 2019). En 2009 la CCRVMA adoptó la primera AMP mundial en alta mar, al sur de las Islas Orcadas del Sur (Sylvester y Brooks 2020), y en 2016 adoptó una segunda en el Mar de Ross. Actualmente están negociando otras tres propuestas en la Antártida Oriental, en el Mar de Weddell y en la zona occidental de la Península Antártica y Sur del Arco de Scotia (Brooks et al. 2020).

Uruguay es Miembro Consultivo del Tratado Antártico y miembro pleno de CCRVMA desde 1985. Por lo tanto, participa de la cogestión de la Antártida y el Océano Austral en régimen de consenso y con un enfoque de gestión basada en evidencia científica (Brooks et al. 2016), junto a otros 28 países. Este proyecto buscó generar conocimiento relevante para informar las posiciones políticas del país en estos ámbitos de discusión, y contribuir a una gestión sostenible de los recursos vivos del Océano Austral.

En el ecosistema marino antártico, los pingüinos son considerados especies centinelas, ya que responden a los cambios que ocurren en los niveles tróficos más bajos, reflejando de forma rápida los cambios ambientales en el medio marino (Le Bohec et al. 2013; Ropert-Coudert et al. 2019). Los cambios en su distribución y abundancia, el éxito reproductivo, la supervivencia y la composición de la dieta, están estrechamente relacionados con

las condiciones generales del ecosistema (Le Bohec et al. 2013; Hinke et al. 2017).

En la región de la PAO, los pingüinos del género *Pygoscelis* han mostrado cambios significativos en sus tendencias poblacionales como consecuencia de los procesos antes mencionados: rápido calentamiento, variabilidad interanual en el hielo marino, disminución del krill antártico. En general, las poblaciones de pingüinos Adelia (*Pygoscelis adeliae*) y barbijo (*P. antarcticus*) han disminuido en esta región (Trivelpiece et al. 2011; Barbosa et al. 2012), mientras que las poblaciones del pingüino papúa (*P. papua*) son estables e incluso están aumentando (Lynch et al. 2010).

En cambio, en el lado opuesto del continente, en la Antártida Oriental, se ha registrado un aumento del 1,5% en la extensión del hielo marino (Massom et al. 2013; Michel et al. 2019). Esto tiene implicancias sobre los pingüinos Adelia, que presentan una distribución circumpolar con casi 4 millones de parejas en todo el continente, y para los cuales el hielo marino es un hábitat clave. En este sentido, mientras que las poblaciones de esta especie en la PAO están disminuyendo, en la Antártida Oriental son estables o están aumentando ligeramente (Southwell et al. 2015). Por lo tanto, la distribución circumpolar de Adelia presenta algunas tendencias locales altamente divergentes que deben entenderse a la luz de las diferentes tendencias e impactos del cambio global alrededor de la Antártida.

Los cambios causados por el ser humano y el clima pueden tener efectos diferenciales en los pingüinos pygoscelídeos, dependiendo de sus estrategias de historia de vida. Las fluctuaciones en el tamaño poblacional se han vinculado con el éxito reproductivo, la supervivencia de adultos o juveniles, en respuesta a factores que operan a una escala local durante la temporada de cría (por ejemplo, disponibilidad de presas o competencia con otras especies o pesquerías), o a gran escala durante la temporada no reproductiva (por ejemplo, extensión del hielo marino en invierno, reclutamiento de krill) (Hinke et al. 2007; Carlini et al. 2009; Cimino et al. 2023; Salmerón et al. 2023). En general, el declive poblacional de los pingüinos Adelia se ha relacionado estrechamente con los cambios a gran escala en la biomasa de krill antártico, su principal presa. En contraste, se considera que los pingüinos papúa se alimentan de manera más generalista y tienen un nicho trófico flexible, aunque también se alimentan principalmente de krill durante el verano austral en la PAO (Polito et al. 2015; Herman et al. 2017; McMahon et al. 2019). Además, se ha propuesto que la migración durante los meses no reproductivos es un factor importante en las tendencias poblacionales de estas especies. Los pingüinos papúa son una especie no migratoria y permanecen cerca de sus colonias de cría durante el invierno, lo que les permite evaluar las condiciones ambientales locales en el sitio de cría, y ajustar su cronología a estas condiciones (Hinke et al. 2012; Juárez et al. 2013). En contraste, los pingüinos Adelia migran grandes distancias a sus hábitats invernales, lo que les impide una respuesta fenológica adecuada a las cambiantes condiciones locales en los sitios de cría (Hinke et al. 2012).

Sin embargo, mientras que la mayoría de las investigaciones en la PAO se han centrado en el efecto potencial de la disponibilidad de presas durante la temporada de verano en las tendencias poblacionales (Hinke et al. 2007; Trivelpiece et al. 2011; Juárez et al. 2013; Cimino et al. 2016; Salmerón et al. 2023), el efecto de otros factores, como las condiciones meteorológicas en el éxito reproductivo, sólo se han estudiado en un número limitado de colonias. Estos estudios han mostrado que las condiciones meteorológicas locales pueden influir directamente en el momento de la reproducción en los pingüinos, la supervivencia de los crías y la masa de los crías al momento del emplume (Lynch et al. 2009, 2012; Hinke et al. 2012; Fraser et al. 2013; Cimino et al. 2014; Juárez et al. 2015). Por ejemplo, se ha sugerido que el aire frío de la primavera y las fuertes tormentas de nieve que impiden el derretimiento de la nieve al comienzo de la temporada de cría pueden retrasar las fechas de inicio de la puesta, dado que estas especies necesitan encontrar áreas libres de nieve para la construcción del nido (Hinke et al. 2012; Lynch et al. 2012; Cimino et al. 2012). Además, esta acumulación de nieve puede provocar el abandono temprano del nido o reducir la supervivencia de los huevos o crías debido a la inundación de los nidos (Trivelpiece & Fraser 1996; Cimino et al. 2014; Juárez et al. 2015). La precipitación, los vientos fuertes y las bajas temperaturas del aire durante períodos críticos, como la eclosión, también pueden ser un factor para reducir la supervivencia de los crías, ya que los pichones recién nacidos son particularmente vulnerables a la hipotermia durante este período (Moreno et al. 1995; Olmastroni et al. 2004; Demongin et al. 2010; Chapman et al. 2011; Smiley & Emmerson 2016).

La comparación en las respuestas de colonias de ambas especies expuestas a las mismas condiciones ambientales ofrece una oportunidad única para comprender el peso relativo que distintas presiones pueden estar teniendo en las tendencias poblacionales observadas. Este conocimiento puede contribuir a entender el impacto que estas actividades pueden estar teniendo sobre otros componentes del ecosistema marino antártico. La información sobre especies clave, como el krill, las aves y los mamíferos marinos sigue siendo inadecuada para comprender plenamente la dinámica de los ecosistemas antárticos. Esta es información clave para diseñar medidas efectivas de gestión del Océano Austral.

El objetivo del proyecto fue evaluar el impacto relativo de distintos componentes del cambio global sobre los recursos vivos del Océano Austral, utilizando a los pingüinos como centinelas del ecosistema marino. Específicamente el impacto relativo de a) las condiciones climáticas locales, b) la disponibilidad de alimento, c) la presión de pesca, y 4) la actividad humana en la cercanía de las colonias.

Metodología/Diseño del estudio

El proyecto se enfocó principalmente en el estudio de las colonias reproductivas de pingüinos Adelia y papúa en Isla Ardley, un Zona Antártica Especialmente Protegida, ubicada al Sur de la Isla Rey Jorge, en el norte de la Península Antártica. Esta es una de las zonas más afectadas por el cambio climático, y concentra además elevados valores de actividad humana, incluyendo bases científicas y otras infraestructuras permanentes, y zonas altamente visitadas por turistas (Hogg et al., 2020). Los resultados obtenidos fueron luego comparados con observaciones en colonias de Punta Stranger, Bahía Esperanza y Tierra de Adèle, en la Antártida oriental, que presentan valores contrastantes en términos de actividades humanas, presión de pesca, disponibilidad de alimento y cambios en las condiciones climáticas. Las colonias de Isla Ardley fueron monitoreadas por un periodo de 6 años: verano 2019/20 a verano 2024/25, incluyendo el año de la pandemia de COVID 19, con una marcada disminución en la actividad humana en la Península.

El tamaño de las colonias reproductivas fue monitoreado utilizando los métodos estándar de la CCRVMA (CCAMLR, 2014). Se realizaron tres conteos a lo largo de las temporadas de cría: (a) el número de nidos con huevos; (b) el número de nidos con pichones; y (c) el número de crías en guardería. También se registró la masa de los crías y se calcularon tres índices de éxito reproductivo para tener en cuenta las variaciones en cada etapa a lo largo de la temporada. Para cada temporada calculamos: 1) éxito reproductivo (número de crías en guardería dividido por el número de nidos con huevos); 2) proporción de nidos con huevos que eclosionaron con éxito (número de nidos con crías dividido por el número de nidos con huevos); 3) supervivencia de las crías (número de crías en guardería dividido por el número de nidos con crías).

Para estimar los efectos de la variabilidad en la oferta de presas sobre el éxito reproductivo y las condiciones corporales de los adultos reproductivos se estudiaron los viajes de alimentación durante el periodo de cuidados intensivos, en diciembre de cada año. Un total de 88 pingüinos Adelia y 101 pingüinos papúa fueron equipados con dataloggers incluyendo GPS, acelerómetro y sensores de presión y temperatura (Axy-Trek, 70 x 40 x 15 mm, 69 g; TechnoSmart, Italia), registrando un total de 839 viajes de alimentación a lo largo del periodo de estudio. Para cada individuo calculamos la duración y la distancia total del viaje (la distancia horizontal acumulada entre todas las ubicaciones de GPS registradas en el viaje) y la distancia máxima a la colonia (como la distancia en línea recta entre la colonia y el punto más lejano de un viaje). A partir de los datos de los acelerómetros calculamos el gasto energético de los viajes de alimentación utilizando la relación entre el gasto energético diario (DEE) y la aceleración corporal dinámica específica de cada actividad (DBA) construida y validada para pingüinos Adelia de Tierra de Adèle (Hicks et al., 2020). También a partir de los datos de acelerómetros identificamos las zonas de alimentación, definidas como aquellas donde se concentran los buceos en los que los animales capturan un número significativo de presas. Para esto se desarrolló un abordaje metodológico basado en el enfoque desarrollado por Chimienti et al. (2016, 2022) para caracterizar los comportamientos latentes y determinar en qué inmersiones los pingüinos intentan capturar presas. Para determinar los años con alta y baja disponibilidad de krill se utilizó la información de censos acústicos realizados en la zona por Salmerón et al. (2023).

Los individuos marcados fueron pesados y se recogieron muestras de sangre y plumas para 1) estudiar la dieta a través de análisis de isótopos estables en plumas y sangre, 2) determinar el sexo y 3) estimar la condición fisiológica de los individuos a través del análisis de frotis de sangre. El valor de isótopos estables en un tejido refleja la composición de la dieta y el hábitat de alimentación durante el tiempo de síntesis de ese tejido. Los valores analizados de isótopos estables de carbono ($\delta^{13}C$) y nitrógeno ($\delta^{15}N$) de la sangre total nos permitieron comparar las dietas con las que los pingüinos alimentaron a sus polluelos durante el periodo de estudio. El análisis de isótopos estables de las plumas permitió estudiar la composición de la dieta luego de finalizada la temporada reproductiva anterior, antes de la muda.

Para describir las condiciones meteorológicas en la colonia utilizamos datos meteorológicos medidos in situ entre 1970 y 2024 en la estación de la base chilena Frei, a unos 4 km de las colonias de estudio. Las variables utilizadas fueron la temperatura y la precipitación diaria de Frei, y la velocidad y dirección del viento. La climatología del área se calculó como el promedio de cada día para cada variable durante un periodo de más de 50 años. Luego, ese valor climatológico fue restado del respectivo día para cada uno de los años de estudio, para calcular la anomalía de cada día. El enfriamiento por viento se calculó utilizando la temperatura del aire y la velocidad del viento, siguiendo a Oszceviski y Bluestein (2005). Se utilizaron datos complementarios de reanálisis para estudiar la situación sinóptica (Saha et al. 2010).

Finalmente, durante el periodo de estudio más de 50 pingüinos de Adelia fueron equipados con geolocalizadores (GLS; Lotek UK Ltd, Dorset, United Kingdom) para estudiar sus movimientos y patrones de actividad fuera de la época reproductiva. A partir de estos datos se identificaron las áreas utilizadas durante tres etapas clave fueran del periodo reproductivo: 1) inmediatamente antes y 2) después de la muda, momentos en los que tienen que generar y recuperar reservas para prepararse y recuperarse de una muda de alto consumo energético (cuando mudan, los pingüinos de Adelia pierden todo su plumaje, pasando una media de 16-19 días ayunando en el hielo); 3) antes de comenzar la temporada de cría, ya que tienen que acumular reservas para soportar las demandas energéticas de la incubación y la crianza de los pichones.

Resultados, análisis y discusión

En términos generales, mientras que durante el periodo de estudio la población reproductiva de pingüinos Adelia disminuyó más de un 30%, las parejas reproductoras de pingüinos papúa aumentaron un 17%. Sin embargo, el éxito reproductivo de ambas especies fue similar (1.1 - 1.3 pollitos por pareja) y relativamente estable a lo largo del periodo de estudio, con la excepción de la temporada 2023/24, en la que el éxito reproductivo de los pingüinos de Adelia fue particularmente bajo, pero no el de papúas. Esto estuvo asociado a condiciones meteorológicas excepcionales que retrasaron el derretimiento de la nieve y provocaron una alta tasa de mortalidad de los pichones recién nacidos en ambas especies (o la falla en la eclosión de los huevos). Dado que fue un año con alta disponibilidad de alimento (inferido a partir de los patrones de movimiento observados durante los viajes de alimentación), los pingüinos papúa, que tienen la posibilidad de iniciar su nidificación más tarde y un periodo de cuidado parental más largo, tuvieron la posibilidad de contrarrestar los efectos negativos de un mal inicio de la temporada reproductiva, y lograr una alta tasa de éxito en la sobrevivencia de los pichones que lograron superar la primera etapa (Machado-Gaye et al., en prensa).

Los viajes de alimentación variaron significativamente su duración en función de la especie, la etapa del periodo reproductivo, la disponibilidad de alimento y el sexo de los individuos (Machado-Gaye et al., 2024, 2025, en prensa; Soutullo et al., 2024). En general los viajes de alimentación son de características similares, pero los de Adelia son más variables entre años. En ambos casos, los viajes suelen durar entre 9 y 24 hs, y restringirse a la cercanía de las colonias (en general menos de 25 km de distancia máxima), con zonas de alimentación estables que se concentran en sectores del área de estudio donde las características batimétricas contribuyen a una alta retención de krill en las cercanías de la colonia (a menos de 20 km) (Machado-Gaye et al., 2024, 2025, en prensa; Riaz et al., en prensa; Soutullo et al., 2024).

En el caso de los pingüinos de Adelia, en años en los que hay poca disponibilidad de krill, los individuos extienden la duración de los viajes (Riaz et al., en prensa), sin cambios significativos en la contribución de distintos ítems alimentarios a la dieta, que es dominada por krill (más del 50%) y en menor

proporción por peces (Zaldúa et al., en prep). Las hembras amplían tanto la distancia como la duración de sus viajes de búsqueda de alimento, lo que se traduce en un mayor gasto energético en comparación con los machos (Machado-Gaye et al., 2025). El costo energético de la búsqueda de alimento fue aproximadamente un 20% superior para las hembras que para los machos cuando hay poca abundancia de krill, sin diferencias entre sexos cuando la abundancia es alta. Las hembras aumentaron su gasto energético en aproximadamente un 40% en años con escasez de krill. En esas condiciones la masa corporal de los pingüinos Adelia fue aproximadamente un 40% inferior a la de un año bueno (4 vs 6 kg), sin embargo no se encontraron diferencias en los demás marcadores de condición corporal analizados (Machado-Gaye et al., 2025).

Se ha propuesto que las condiciones meteorológicas al inicio de la temporada de cría, en concreto las temperaturas medias de octubre y la acumulación de nieve en los lugares de nidificación, son factores relevantes que afectan al éxito reproductivo (Lynch et al. 2009, 2012; Hinke et al. 2012; Juárez et al. 2013). El principal mecanismo propuesto para explicar este proceso es que el aumento de la acumulación de nieve y las bajas temperaturas que impiden el deshielo temprano pueden provocar la pérdida del hábitat de cría al principio de la temporada, así como el aumento del fallo de los huevos y la pérdida de pollos debido a que el deshielo tardío empapa a los pollos, provocando hipotermia. En la Antártida oriental, se ha informado de que el pico de fracaso de los nidos de pingüino Adelia se produjo en los primeros días después de la eclosión, ya que los polluelos aún no regulan completamente su temperatura corporal, siendo especialmente vulnerables a las condiciones ambientales desfavorables (Olmastroni et al. 2004; Smiley & Emmerson 2016). Por el contrario, en el caso de los pingüinos papúa se ha sugerido que la mayor capacidad de alterar su cronología reproductiva retrasando el momento de la puesta de huevos en condiciones locales desfavorables, o incluso volviendo a poner tras el fracaso temprano de los nidos, les permite amortiguar los impactos en su éxito reproductivo en condiciones cambiantes (Lynch et al. 2009, 2012; Hinke et al. 2012, Juárez et al. 2015).

En general, el estudio de la respuesta de los pingüinos Adelia y papúa a variaciones en las condiciones en la PAO durante la temporada reproductiva brinda información relevante sobre algunos de los factores que afectan a la persistencia de estas poblaciones en escenarios de cambio climático, así como el papel de la flexibilidad en el comportamiento a la hora de amortiguar algunos de los impactos de estos cambios. En el caso concreto de los pingüinos Adelia que se reproducen en la isla de Ardley, las tendencias poblacionales observadas son probablemente consecuencia de una serie de procesos ecológicos que actúan a diferentes escalas espaciales y temporales. Por ejemplo, el marcado descenso de parejas reproductoras podría estar relacionado con unas condiciones de cría inusualmente malas en algunos años. Las malas condiciones durante la estación reproductiva pueden afectar al número de parejas reproductoras que intentan reproducirse al año siguiente. Tampoco pueden ignorarse los factores que influyen en la supervivencia invernal de los adultos reproductores. Esto podría estar relacionado con la mala condición corporal en la que terminan la temporada de cría, particularmente las hembras, pero también con las condiciones adversas durante la temporada no reproductiva, a kilómetros de distancia de las zonas de cría. A pesar de no tener efectos evidentes sobre el éxito reproductor, la baja disponibilidad de krill podría tener efectos sutiles sobre la supervivencia de los adultos que son difíciles de evaluar adecuadamente (Machado-Gaye et al., 2025).

Tres subáreas de la CCRVMA (48.1, 48.2 y 48.5) y zonas situadas fuera del área de la convención fueron ampliamente utilizadas por los pingüinos Adelia durante las etapas clave de la temporada no reproductiva. Principalmente lugares donde la concentración de hielo marino ronda el entorno del 80% (Zaldúa et al., 2024). Un elemento clave para garantizar la supervivencia de los adultos, el principal determinante de la estabilidad de la población, es que los individuos deben ser capaces de recuperarse de las etapas de cría y muda, altamente exigentes desde el punto de vista energético, y ganar reservas antes del comienzo de la siguiente etapa reproductiva. Durante este periodo el krill sigue siendo el principal ítem alimenticio, pero el consumo de calamares se vuelve más relevante que de peces (Zaldúa et al., en prep.). Estas zonas también son utilizadas por la pesquería de krill, posiblemente solapándose en el espacio y el tiempo durante las etapas pre y post reproductiva.

La temporada 2020/21, en la que como consecuencia de la pandemia de COVID la actividad humana se restringió al mínimo en el entorno de las colonias, no fue un año particularmente bueno en término de éxito reproductivo para ninguna de las 2 especies. De hecho, se registraron las crías con menor peso dentro del periodo de estudio. Esto sugiere que durante la época reproductiva los efectos de las malas condiciones meteorológicas y la menor disponibilidad de alimento (inferido a partir de las características de los viajes de alimentación), tuvieron un efecto relativo mayor sobre las colonias, que la falta de actividad humana (Machado-Gaye et al., en prensa). La combinación de malas condiciones meteorológicas en las colonias al inicio de la temporada reproductiva, sumado a la escasez de alimento durante el verano y a factores que afectan la supervivencia de adultos (en particular las hembras) durante el invierno, parece ser determinante en las tendencias negativas de los pingüinos de Adelia en Isla Ardley. Por el contrario, en el caso de los pingüinos papúa, que permanecen en la cercanía de las colonias durante el invierno (Korczak-Abshire et al., 2021), la mayor capacidad de alterar su cronología reproductiva ajustando el momento de la puesta de huevos a las condiciones locales, les permite amortiguar los impactos en su éxito reproductivo en condiciones cambiantes.

Aunque no son decisivos por sí solos, todos estos efectos podrían contribuir a una acumulación de impactos sutiles que, tomados en conjunto, pueden tener un impacto significativo en el destino también de otras poblaciones en la PAO, lo que destaca la importancia de implementar esfuerzos dirigidos a minimizar cualquier impacto manejable. Por ejemplo, la pesca. La pesca puede reducir la disponibilidad de krill para sus predadores mediante reducciones absolutas de la biomasa de krill (competencia por explotación) o cambiando la estructura de los cardúmenes de krill o su distribución en la columna de agua (competencia por interferencia) (Watters et al., 2020). Cuando las escalas temporales y espaciales de los límites de capturas son más amplias que las escalas de las interacciones predador-presa, es difícil alcanzar objetivos de gestión del ecosistema que consideren la conservación de los predadores (Watters et al., 2020). En consecuencia, varios trabajos han señalado la necesidad de un marco de explotación del krill que garantice una protección precautoria a pequeña escala para minimizar los efectos negativos sobre las especies dependientes del krill (Santa Cruz et al., 2018; Watters et al., 2020; Trathan et al., 2022).

Conclusiones y recomendaciones

La dependencia de los pingüinos Adelia de recursos de diferentes subáreas en diferentes épocas del año subraya la necesidad de incorporar la

dimensión temporal de la utilización de los recursos a la hora de diseñar medidas de conservación en el Océano Austral. Una adecuada gestión de los recursos marinos en la zona podría depender tanto de 1) Áreas Marinas Protegidas (AMPs) bien diseñadas y gestionadas en el Dominio 1 y el Mar de Weddell, como de 2) una gestión de la pesquería a pequeña escala, que considere simultáneamente las actividades que se llevan a cabo en diferentes unidades de gestión. Sin una gestión de los ecosistemas que tenga en cuenta tanto las escalas pequeñas como las grandes, existe un alto riesgo de que la CCRVMA no consiga alcanzar los objetivos de conservación acordados, así como los objetivos globales establecidos para proteger la biodiversidad marina y las funciones y servicios de los ecosistemas (Zaldúa et al., 2024).

Para evitar impactos adicionales en las colonias de la PAO, parece necesario implementar un manejo que integre la creación de AMPs con el ordenamiento de la actividad pesquera. En el norte de la PAO esto puede implicar, por ejemplo, limitar la pesca en la cercanía de las colonias reproductivas durante los meses de diciembre/enero, cuando la demanda energética es máxima y los adultos concentran su actividad en el entorno de las colonias, así como en las zonas pre y post-reproductivas durante octubre/noviembre y enero/febrero. Para esto puede resultar útil la creación de pequeñas áreas protegidas en el entorno de las colonias y retrasar el inicio de la temporada de pesca hasta mediados de febrero, de forma de evitar que el pico de máxima actividad coincida con los períodos de mayor vulnerabilidad para estas aves.

El desarrollo de medidas de gestión efectivas requiere comprender cómo se distribuyen espacialmente el krill y sus predadores, cuánto krill consumen estos predadores y cómo responden a los cambios en la distribución y abundancia de sus presas. La aplicación de medidas de conservación dirigidas a evitar presiones adicionales sobre las principales zonas de alimentación, o las zonas a las que recurren las colonias cuando disminuye la disponibilidad de presas, podría desempeñar un papel clave en la disminución del impacto potencial de las pesquerías sobre las poblaciones de predadores. Las características batimétricas y oceanográficas, como los frentes de ruptura de la plataforma, los remolinos, los cañones submarinos y los montes submarinos, aumentan la disponibilidad de zooplancton mediante procesos físicos que afectan a la distribución vertical de nutrientes, siendo zonas importantes para los predadores marinos. La identificación de sectores donde se concentra la actividad de alimentación durante la etapa más crítica del periodo reproductivo permitiría identificar áreas de importancia ecológica que requieren especial consideración en las medidas de gestión. Tanto al planificar la gestión de unidades de gestión a pequeña escala como de AMPs. El abordaje metodológico desarrollado en este proyecto para identificar esas áreas (Machado-Gaye et al., 2024) puede constituir una herramienta particularmente valiosa para ese propósito.

Productos derivados del proyecto

Tipo de producto	Título	Autores	Identificadores	URI en repositorio de Silo	Estado
Artículo científico	Energy expenditure of Adélie penguins during the breeding season: females pay the cost in years of low food availability	A.L. Machado-Gaye, M. Chimienti, A. Kato, Y. Ropert-Coudert, A. Barbosa, P. Bustamante, M. Cosse, J. Menéndez-Blázquez, N. Zaldúa, A. Soutullo	https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2025.123144	https://hdl.handle.net/20.500.12381/3913	Finalizado
Artículo científico	Changing the focus: The need for cross-scale dynamic management in the Southern Ocean and implications for holistic conservation of Antarctic marine living resources	N. Zaldúa, Z. Zajková, A.L. Machado-Gaye, V. Franco-Trecu, M. Cosse, Y. Ropert-Coudert, A. Kato, A. Soutullo	https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106361	https://hdl.handle.net/20.500.12381/3928	Finalizado
Artículo científico	From spatial prioritization to conservation management in the Southern Ocean using the marine IBAs approach	A. Soutullo, M. Raslan, A.L. Machado-Gaye	https://doi.org/10.1016/j.biocon.2024.110721	https://hdl.handle.net/20.500.12381/3915	Finalizado
Artículo científico	Using latent behavior analysis to identify key foraging areas for Adélie penguins in a declining colony in West	AL Machado-Gaye, Akiko Kato, Marianna Chimienti, N Gobel, Yan Ropert-Coudert, A Barbosa, A Soutullo	https://doi.org/10.1007/s00227-024-04390-w	https://hdl.handle.net/20.500.12381/3914	Finalizado

Tipo de producto	Título	Autores	Identificadores	URI en repositorio de Silo	Estado
	Antarctic Peninsula				
Artículo científico	Unexpected Delayed Incursion of Highly Pathogenic Avian Influenza H5N1 (Clade 2.3.4.4b) Into the Antarctic Region	Simeon Lisovski, Anne Günther, Meagan Dewar, David Ainley, Fabián Aldunate, Rodrigo Arce, Grant Ballard, Silke Bauer, Josabel Belliure, Ashley C Banyard, Thierry Boulinier, Ashley Bennison, Christina Braun, Craig Cary, Paulo Catry, Augustin Clessin, Maelle Connan, Edna Correia, Aidan Cox, Juan Cristina, Megan Elrod, Julia Emerit, Irene Ferreira, Zoe Fowler, Amandine Gamble, José P Granadeiro, Joaquin Hurtado, Dennis Jongsomjit, Célie Lesage, Mathilde Lejeune, Amanda Kuepfer, Amélie Lescroët, Amy Li, Ian R McDonald, Javier Menéndez, Blázquez, Virginia Morandini, Gonzalo Moratorio, Teresa Militão,	https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/irv.70010	https://hdl.handle.net/20.500.12381/3903	Finalizado

Tipo de producto	Título	Autores	Identificadores	URI en repositorio de Silo	Estado
		Pilar Moreno, Paula Perbolianachis, Jean Pennycook, Maryam Raslan, Scott M Reid, Roanna Richards? Babbage, Annie E Schmidt, Martha Maria Sander, Lucy Smyth, Alvaro Soutullo, Andrew Stanworth, Léo Streith, Jérémy Tornos, Arvind Varsani, Ulrike Herzschuh, Martin Beer, Michelle Wille			

Artículo científico	Circumpolar assessment of mercury contamination: the Adélie penguin as a bioindicator of Antarctic marine ecosystems	Fanny Cusset, Paco Bustamante, Alice Carravieri, Clément Bertin, Rebecka Brasso, Ilaria Corsi, Michael Dunn, Louise Emmerson, Gaël Guillou, Tom Hart, Mariana Juárez, Akiko Kato, Ana Laura Machado-Gaye, Candice Michelot, Silvia Olmastroni, Michael Polito, Thierry Raclot, Mercedes Santos, Annie Schmidt, Colin Southwell, Alvaro Soutullo, Akinori Takahashi, Jean-Baptiste	https://doi.org/10.1007/s10646-023-02709-9	https://hdl.handle.net/20.500.12381/3912	Finalizado
---------------------	--	---	---	---	------------

Tipo de producto	Título	Autores	Identificadores	URI en repositorio de Silo	Estado
		Thiebot, Phil Trathan, Pierre Vivion, Claire Waluda, Jérôme Fort, Yves Cherel			

Referencias bibliográficas

- Atkinson, A., Hill, S. L., Pakhomov, E. A., Siegel, V., Reiss, C. S., Loeb, V. J., ... & Sailley, S. F. (2019). Krill (*Euphausia superba*) distribution contracts southward during rapid regional warming. *Nature Climate Change*, 9(2), 142-147.
- Barbosa, A., Benzal, J., De León, A., & Moreno, J. (2012). Population decline of chinstrap penguins (*Pygoscelis antarctica*) on Deception Island, South Shetlands, Antarctica. *Polar Biology*, 35(9), 1453-1457.
- Brooks, C. M. (2013). Competing values on the Antarctic high seas: CCAMLR and the challenge of marine-protected areas. *The Polar Journal*, 3(2), 277-300.
- Brooks, C. M., Chown, S. L., Douglass, L. L., Raymond, B. P., Shaw, J. D., Sylvester, Z. T., & Torrens, C. L. (2020). Progress towards a representative network of Southern Ocean protected areas. *PloS one*, 15(4), e0231361.
- Brooks, C. M., Crowder, L. B., Curran, L. M., Dunbar, R. B., Ainley, D. G., Dodds, K. J., ... & Sumaila, U. R. (2016). Science-based management in decline in the Southern Ocean. *Science*, 354(6309), 185-187.
- Carlini, A. R., Coria, N. R., Santos, M. M., Negrete, J., Juarez, M. A., & Daneri, G. A. (2009). Responses of *Pygoscelis adeliae* and *P. papua* populations to environmental changes at Isla 25 de Mayo (King George Island). *Polar biology*, 32, 1427-1433.
- Cavanagh, R. D., Melbourne-Thomas, J., Grant, S. M., Barnes, D. K., Hughes, K. A., Halfter, S., ... & Hill, S. L. (2021). Future risk for southern ocean ecosystem services under climate change. *Frontiers in Marine Science*, 7, 1224.
- CCAMLR (2014). CCAMLR Ecosystem Monitoring Program - Standard Methods. Hobart, Tasmania: CCAMLR
- CCAMLR (2018). Text of the Convention on the Conservation of Antarctic Marine Living Resources. <https://www.ccamlr.org/en/organisation/camlr-convention-text#II>
- Chapman, E. W., Hofmann, E. E., Patterson, D. L., Ribic, C. A., & Fraser, W. R. (2011). Marine and terrestrial factors affecting Adelie penguin *Pygoscelis adeliae* chick growth and recruitment off the western Antarctic Peninsula. *Marine Ecology Progress Series*, 436, 273e289. <https://doi.org/10.3354/meps09242>
- Chimienti, M., Cornulier, T., Owen, E., Bolton, M., Davies, I. M., Travis, J. M., & Scott, B. E. (2016). The use of an unsupervised learning approach for characterizing latent behaviors in accelerometer data. *Ecology and Evolution*, 6(3), 727-741.
- Chimienti, M., Kato, A., Hicks, O., Angelier, F., Beaulieu, M., Ouled-Cheikh, J., ... & Ropert-Coudert, Y. (2022). The role of individual variability on the predictive performance of machine learning applied to large bio-logging datasets. *Scientific Reports*, 12(1), 19737.
- Chown, S. L., & Brooks, C. M. (2019). The state and future of Antarctic environments in a global context. *Annual Review of Environment and Resources*, 44, 1-30.
- Cimino, M. A., Fraser, W. R., Patterson-Fraser, D. L., Saba, V. S., & Oliver, M. J. (2014). Large-scale climate and local weather drive interannual variability in Adelie penguin chick fledging mass. *Marine Ecology Progress Series*, 513, 253e268.
- Cimino, M. A., Moline, M. A., Fraser, W. R., Patterson-Fraser, D. L., & Oliver, M. J. (2016). Climate-driven sympatry may not lead to foraging competition between congeneric top-predators. *Scientific reports*, 6(1), 18820.
- Cimino, M., Conroy, J. A., Connors, E., Bowman, J., Corso, A., Ducklow, H., Fraser, W., Friedlaender, A., Kim, H., & Larsen, G. D. (2023). Long-term patterns in ecosystem phenology near Palmer Station, Antarctica, from the perspective of the Adelie penguin. *Ecosphere*, 14.
- Cook, A. J., P. R. Holland, M. P. Meredith, T. Murray, A. Luckman, D. Vaughan. (2016). Ocean forcing of glacier retreat in the western Antarctic Peninsula. *Science* 353: 283–286.
- Demongin, L., Poisbleau, M., Strange, I. J., & Quillfeldt, P. (2010). Effects of severe rains on the mortality of southern rockhopper penguin (*Eudyptes chrysocome*) chicks and its impact on breeding success. *Ornitologia Neotropical*, 21(3), 439-443.
- Fraser, W. R., Patterson-Fraser, D. L., Ribic, C. A., Schofield, O., & Ducklow, H. (2013). A nonmarine source of variability in Adélie penguin demography. *Oceanography*, 26(3), 207-209.
- Gallagher, A.J., Creel, S., Wilson, R.P., Cooke, S.J. (2017). Energy landscapes and the landscape of fear. *Trends Ecol Evol*. 32(2):88–96
- Herman, R. W., Valls, F. C., Hart, T., Petry, M. V., Trivelpiece, W. Z., & Polito, M. J. (2017). Seasonal consistency and individual variation in foraging strategies differ among and within *Pygoscelis* penguin species in the Antarctic Peninsula region. *Marine Biology*, 164, 1-13.
- Hicks, O., Kato, A., Angelier, F., Wisniewska, D. M., Hambly, C., Speakman, J. R., Marcia, C., & Ropert-Coudert, Y. (2020). Acceleration predicts energy expenditure in a fat, flightless, diving bird. *Scientific Reports*, 10.
- Hinke, J. T., Salwicka, K., Trivelpiece, S. G., Watters, G. M., & Trivelpiece, W. Z. (2007). Divergent responses of *Pygoscelis* penguins reveal a common environmental driver. *Oecologia*, 153, 845e855
- Hinke, J. T., Polito, M. J., Reiss, C. S., Trivelpiece, S. G., & Trivelpiece, W. Z. (2012). Flexible reproductive timing can buffer reproductive success of *Pygoscelis* spp. penguins in the Antarctic Peninsula region. *Marine Ecology Progress Series*, 454, 91-104.

Hinke, J. T., Cossio, A. M., Goebel, M. E., Reiss, C. S., Trivelpiece, W. Z., Watters, G. M. (2017). Identifying risk: concurrent overlap of the Antarctic krill fishery with krill-dependent predators in the Scotia Sea. *PloS one*, 12(1).

Hogg, C. J., Lea, M. A., Soler, M. G., Vasquez, V. N., Payo-Payo, A., Parrott, M. L., ... & Brooks, C. M. (2020). Protect the Antarctic Peninsula—before it's too late.

Juárez, M. A., Santos, M. M., Negrete, J., Mennucci, J. A., Perchivale, P. J., Casaux, R., & Coria, N. R. (2015). Adelie penguin population changes at Stranger point: 19 years of monitoring. *Antarctic Science*, 27(5), 455e461.

Juárez, M. A., Santos, M. M., Negrete, J., Santos, M. R., Mennucci, J. A., Rombola, E., Longarzo, L., Coria, N. R., & Carlini, A. R. (2013). Better late than never? Interannual and seasonal variability in breeding chronology of gentoo penguins at Stranger Point, Antarctica. *Polar Research*, 32(1).

Kennicutt II, M. C., Bromwich, D., Liggett, D., Njåstad, B., Peck, L., Rintoul, S. R., ... & Chown, S. L. (2019). Sustained Antarctic research: a 21st century imperative. *One Earth*, 1(1), 95-113.

Korczak-Abshire, M., Hinke, J. T., Milinevsky, G., Juárez, M. A., & Watters G. M. (2021). Coastal regions of the northern Antarctic Peninsula are key for gentoo populations. *Biol. Lett.* 17, 20200708. <http://doi.org/10.1098/rsbl.2020.0708>

Krüger, L., Huerta, M. F., Santa Cruz, F., & Cárdenas, C. A. (2020). Antarctic krill fishery effects over penguin populations under adverse climate conditions: Implications for the management of fishing practices. *Ambio*, 50(3), 560-571.

Le Bohec, C., Whittington, J. D., Le Maho, Y. (2013). Polar monitoring: seabirds as sentinels of marine ecosystems. En: Verde, C. and di Prisco, G. (ed.) *From Pole to Pole: adaptations and evolution in marine environments*. Springer, pp. 205 – 230.

Lynch, H. J., Fagan, W. F., Naveen, R., Trivelpiece, S. G., & Trivelpiece, W. Z. (2009). Timing of clutch initiation in *Pygoscelis* penguins on the Antarctic Peninsula: towards an improved understanding of off-peak census correction factors. *CCAMLR Science*, 16, 149-165.

Lynch, H. J., Naveen, R., Trathan, P. N., & Fagan, W. F. (2012). Spatially integrated assessment reveals widespread changes in penguin populations on the Antarctic Peninsula. *Ecology*, 93(6), 1367e1377.

Lynch, H.J., Crosbie, K., Fagan, W.F., Naveen, R. (2010). Spatial patterns of tour ship traffic in the Antarctic Peninsula region. *Antarctic Science*, 22, 123-130.

Machado-Gaye, A. L., Kato, A., Chimienti, M., Gobel, N., Ropert-Coudert, Y., Barbosa, A., & Soutullo, A. (2024). Using latent behavior analysis to identify key foraging areas for Adélie penguins in a declining colony in West Antarctic Peninsula. *Marine Biology*, 171(3), 69.

Machado-Gaye, A. L., Chimienti, M., Kato, A., Ropert-Coudert, Y., Barbosa, A., Bustamante, P., ... & Soutullo, A. (2025). Energy expenditure of Adélie penguins during the breeding season: females pay the cost in years of low food availability. *Animal Behaviour*, 222, 123144.

Machado-Gaye A.L., Manta, G., Braun, C., Menéndez-Blázquez, J., Raslan, M., Zaldúa, N., Soutullo, A. (en prensa). Divergent responses of *Pygoscelis* penguins to unfavourable weather conditions in the South Shetland Islands. *Antarctic Science*.

Massom, R., Reid, P., Stammerjohn, S., Raymond, B., Fraser, A., & Ushio, S. (2013). Change and variability in East Antarctic sea ice seasonality, 1979/80–2009/10. *PLoS One*, 8(5), e64756.

McMahon, K. W., Michelson, C. I., Hart, T., McCarthy, M. D., Patterson, W. P., & Polito, M. J. (2019). Divergent trophic responses of sympatric penguin species to historic anthropogenic exploitation and recent climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(51), 25721-25727.

Michel, L. N., Danis, B., Dubois, P., Eleaume, M., Fournier, J., Gallut, C., ... & Lepoint, G. (2019). Increased sea ice cover alters food web structure in East Antarctica. *Scientific reports*, 9(1), 1-11.

Moffat, C., & Meredith, M. (2018). Shelf–ocean exchange and hydrography west of the Antarctic Peninsula: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2122), 20170164.

Moreno, J., Bustamante, J., & Viñuela, J. (1995). Nest maintenance and stone theft in the chinstrap penguin (*Pygoscelis antarctica*) 1. Sex roles and effects on fitness. *Polar Biology*, 15, 533-540.

Morley, S. A., Abele, D., Barnes, D. K., Cárdenas, C. A., Cotté, C., Gutt, J., ... & Waller, C. I. (2020). Global drivers on Southern Ocean ecosystems: changing physical environments and anthropogenic pressures in an Earth system. *Frontiers in Marine Science*, 7, 1097.

Olmastroni, S., Pezzo, F., Volpi, V., & Focardi, S. (2004). Effects of weather and sea-ice on the reproductive performance of the Adélie penguin at Edmonson Point, Ross Sea. *CCAMLR Sci*, 11, 99-109.

Osczevski, R., & Bluestein, M. (2005). The new wind chill equivalent temperature chart. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(10), 1453-1458.

Polito, M. J., Trivelpiece, W. Z., Patterson, W. P., Karnovsky, N. J., Reiss, C. S., & Emslie, S. D. (2015). Contrasting specialist and generalist patterns facilitate foraging niche partitioning in sympatric populations of *Pygoscelis* penguins. *Marine Ecology Progress Series*, 519, 221-237.

Riaz, J., Machado-Gaye, A.L., Chimienti, M., Kato, A., Ropert-Coudert, Y., Alegría, N., Barbosa, A., Soutullo, A. (en prensa). Bout time for krill - contrasting Adélie penguin foraging behaviour during years of high and low krill availability. *Animal Behaviour*.

Rogers, A. D., Frinault, B. A. V., Barnes, D. K. A., Bindoff, N. L., Downie, R., Ducklow, H. W., et al. (2020). Antarctic Futures: An Assessment of Climate-Driven Changes in Ecosystem Structure, Function, and Service Provisioning in the Southern Ocean. *Ann. Rev. Mar. Sci.* 12, 87–120

Ropert-Coudert, Y., Chiaradia, A., Ainley, D., Barbosa, A., Boersma, P. D., Brasso, R., ... & Trathan, P. N. (2019). Happy feet in a hostile world? The future of penguins depends on proactive management of current and expected threats. *Frontiers in Marine Science*, 6, 248.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., et al. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1058.

Salmerón, N., Belle, S., Cruz, F. S., Alegría, N., Finger, J. V. G., Corá, D. H., Petry, M. V., Hernández, C., Cárdenas, C., & Krüger, L. (2023). Contrasting environmental conditions precluded lower availability of Antarctic krill affecting breeding chinstrap penguins in the Antarctic Peninsula. *Scientific Reports*, 13(1), 5265.

Santa Cruz, F., Ernst, B., Arata, J. A., & Parada, C. (2018). Spatial and temporal dynamics of the Antarctic krill fishery in fishing hotspots in the Bransfield Strait and South Shetland Islands. *Fisheries Research*, 208, 157e166.

Siebert, M., Atkinson, A., Banwell, A., Brandon, M., Convey, P., Davies, B., ... & Vaughan, D. (2019). The Antarctic Peninsula under a 1.5°C global warming scenario. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 102.

Smiley, K. M., & Emmerson, L. M. (2016). A matter of timing: Adélie penguin reproductive success in a seasonally varying environment. *Marine Ecology*

Progress Series, 542, 235-249.

Southwell, C., Emerson, L., McKinlay, J., Newbery, K., Takahashi, A., Kato, A., ... & Weimerskirch, H. (2015). Spatially extensive standardized surveys reveal widespread, multi-decadal increase in East Antarctic Adélie penguin populations. *PLoS one*, 10(10), e0139877.

Soutullo, A., Raslan, M., & Machado-Gaye, A. L. (2024). From spatial prioritization to conservation management in the Southern Ocean using the marine IBAs approach. *Biological Conservation*, 296, 110721.

Stammerjohn, S. E., D. G. Martinson, R. C. Smith, X. Yuan, and D. Rind.(2008). Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to El Niño–Southern Oscillation and Southern Annular Mode variability. *Journal of Geophysical Research* 113: C03S90.

Sylvester, Z. T., & Brooks, C. M. (2020). Protecting Antarctica through co-production of actionable science: Lessons from the CCAMLR marine protected area process. *Marine Policy*, 111, 103720.

Sylvester, Z. T., & Brooks, C. M. (2020). Protecting Antarctica through Co-production of actionable science: lessons from the CCAMLR marine protected area process. *Marine Policy*, 111, 103720.

Trathan, P. N., Warwick-Evans, V., Young, E. F., Friedlaender, A., Kim, J. H., & Kokubun, N. (2022). The ecosystem approach to management of the Antarctic krill fishery e the 'devils are in the detail' at small spatial and temporal scales. *Journal of Marine Systems*, 225.

Trivelpiece, W. Z., Hinke, J. T., Miller, A. K., Reiss, C. S., Trivelpiece, S. G., Watters, G. M. (2011). Variability in krill biomass links harvesting and climate warming to penguin population changes in Antarctica. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(18).

Watters, G. M., Hinke, J. T., & Reiss, C. S. (2020). Long-term observations from Antarctica demonstrate that mismatched scales of fisheries management and predator-prey interaction lead to erroneous conclusions about precaution. *Scientific Reports*, 10

Zaldúa, N., Zajkova, Z., Machado-Gaye, A. L., Franco-Trecu, V., Cosse, M., Ropert-Coudert, Y., Kato, A., & Soutullo, A. (2024). Changing the focus: The need for cross-scale dynamic management in the Southern Ocean and implications for holistic conservation of Antarctic marine living resources. *Marine Policy*, 170, Article 106361.

Zaldúa N., Franco-Trecu V., Machado-Gaye A.L., Raslan M., Gobel, N., Juárez M., Zajková Z., & Soutullo A. Adélie penguin trophic strategies in the Western Antarctic Peninsula: a generalist approach with temporal and sexual variability. *Manuscrito en preparación*.

Licenciamiento

Reconocimiento-Compartir Igual 4.0 Internacional. (CC BY-SA)

