



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Naturales y Oceanografía

**DINÁMICA ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA
PESCA DE KRILL ANTÁRTICO:
IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE
CALADEROS BASADA EN OPORTUNIDADES
DE PESCA**

Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanografía de la Universidad de Concepción, para optar al grado de Magíster en Ciencias con Mención en Pesquerías

POR: Gabriela Torretti Cortés

Profesor Guía: Luis Cubillos Santander

Agosto, 2025

CONCEPCIÓN-CHILE

La presente tesis se realizó en el Departamento de Oceanografía de la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanografía de la Universidad de Concepción y ha sido aprobada por la siguiente Comisión Evaluadora:

Profesor Guía

Dr. Luis Cubillos

Departamento de Oceanografía

Universidad de Concepción

Comisión Evaluadora



Dr. Billy Ernst

Departamento de Oceanografía

Universidad de Concepción

Dr. Ramiro Riquelme

Departamento de Zoología

Universidad de Concepción

MSc. Francisco Santa Cruz

Instituto Antártico Chileno (INACH)

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis representa el cierre de una etapa significativa en mi vida, marcada por desafíos, aprendizajes y crecimiento. Quisiera comenzar expresando mi sincero agradecimiento a quienes me acompañaron desde los primeros pasos que me condujeron hasta aquí.

Durante mis años como observadora científica, tuve la oportunidad de convivir con un equipo humano excepcional. En particular, deseo agradecer a Don Enrique Gutiérrez y a Juan Velásquez, quienes no solo me brindaron su apoyo y confianza durante ese tiempo, sino que también jugaron un rol fundamental en mi decisión de continuar mi formación académica.

Agradezco de manera especial al profesor Luis Cubillos, quien acepto ser mi profesor guía en este proceso. Su compromiso, paciencia y conocimientos fueron esenciales para avanzar, especialmente en aspectos que inicialmente me resultaban ajenos. Extiendo también mi gratitud a todos los profesores del Magister, por su dedicación y la entrega en la formación de profesionales.

Deseo reconocer también de mi compañero de magister, Hans Ttito, por su constante disposición a ayudarme, su generosidad al compartir su conocimiento y por creer en mí a lo largo de este proceso.

A mi familia, y en especial a mis padres, gracias por siempre apoyarme en los momentos difíciles, por darme ánimo de seguir avanzando para lograr mis objetivos. A mi pareja Andrés por creer en mí y brindarme su apoyo incondicional para terminar esta etapa.

Por último, quiero agradecerme a mí misma, este camino ha sido también un ejercicio de confianza personal, y hoy reconozco con orgullo el esfuerzo y la perseverancia que me han traído hasta aquí.

ÍNDICE

RESUMEN	x
INTRODUCCIÓN	1
Regulación de la pesquería	4
Definición de caladero de pesca.....	8
OBJETIVOS	14
Objetivo General	14
Objetivos Específicos.....	14
HIPÓTESIS	15
CAPÍTULO I Identification and Characterization of Antarctic Krill (<i>Euphausia superba</i> Dana, 1850) Fishing Grounds Based on Fishing Opportunities in Subareas 48.1 and 48.2	16
Abstract	17
Introduction	18
Materials and Methods	20
Study area and data	20
Data analysis and fishing opportunities	21
Characteristics of fishing opportunities and species composition in the bycatch	22
Proportion of gravid females and juveniles	23
Catch per unit effort (CPUE)	24
Results	24
Species composition in the bycatch	26
Proportion of gravid females.....	28
Proportion of juveniles.....	30
Trends in catch per unit effort (CPUE) and fishing opportunity.....	31
Discussion	32
References	36
Capítulo II Análisis espacial y temporal de la tasa de captura de krill antártico (<i>Euphausia superba</i>) en oportunidades de pesca recurrentes en las subáreas 48.1 y 48.2	43
Resumen	43
Introducción	44
Materiales y Métodos	48

Datos analizados	48
Agrupamiento	49
Oportunidades de pesca	50
Variables ambientales y tendencia de la captura por unidad de esfuerzo	50
Modelo espacial	51
Modelo espaciotemporal	51
Referencias.....	67
VERIFICACIÓN DE LA HIPOTESIS PLANTEADA.....	72



ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figure 1. Distribution of recurrent (rpo) (more than 50 sets, covers all years), sporadic (spo) (more than 10 sets less than 49 and covers half of the years) and unusual (upo) (less than 10 sets and covers less than 3 years) fishing opportunities from 2017 to 2024.	25
Figure 2. Dendrogram of the species composition present in the bycatch of the antarctic krill (<i>Euphausia superba</i>) fishery in recurrent fishing opportunities.	27
Figure 3. Correspondence analysis between the species composition of the bycatch in the total catches of the antarctic krill fishery (<i>E. superba</i>) by recurrent fishing opportunities.	28
Figure 4. Proportion of gravid females per year in each recurrent fishing opportunity in the antarctic krill fishery.	30
Figure 5. Proportion of juveniles per year in the different recurring fishing opportunities in the antarctic krill fishery.	31
Figure 6. Catch rate performance by recurring fishing opportunity in the antarctic krill fishery from 2018-2024.	32

CAPÍTULO II

Figura 1. Lances pertenecientes a las oportunidades de pesca recurrentes en la pesquería de krill antártico en las subáreas estadísticas 48.1 (Estrecho de Bransfield) y 48.1 (Isla Orcadas del Sur). Los colores representan las oportunidades de pesca recurrentes a las que pertenece cada lance, las oportunidades de pesca D, E y F corresponden a la subárea 48.1, mientras que A, B, C y G corresponden a la 48.2.	49
Figura 2. Efectos de las variables fijas Distancia y Oportunidad de pesca recurrentes sobre la tasa de captura en la pesquería de krill antártico donde los gráficos (A) y (C)	

corresponden a la subárea 48.1, mientras que (B) y (D) pertenecen a la subárea 48.2. Los gráficos (A) y (B) son la distancia recorrida en millas náuticas (MN) durante el arrastre. Los gráficos (C) y (D) corresponden a las oportunidades de pesca recurrentes en las subáreas 48.1 y 48.2, respectivamente.....55

Figura 3. Efectos aleatorios de las variables ambientales Temperatura (°C), Profundidad de Arrastre (m) y Fuerza del Viento sobre la CPUE en las operaciones de pesca de krill antártico. El panel izquierdo corresponde a la subárea 48.1 y el derecho a la subárea 48.2. Las curvas azules representan los valores medios posteriores, y las bandas grises indican los intervalos de credibilidad del 95 %. Mientras que los paneles E y F, los puntos azules muestran los valores medios posteriores y las barras indican los intervalos de credibilidad del 95%.....56

Figura 4. Efectos aleatorios operacionales de las variables velocidad de arrastre (nudos) y rumbo (dirección en la cual realiza el arrastre) sobre la CPUE en las operaciones de pesca de krill antártico. El panel izquierdo corresponde a la subárea 48.1 y el derecho a la subárea 48.2. Las curvas azules representan los valores medios posteriores, y las bandas grises indican los intervalos de credibilidad del 95 %.....57

Figura 5. Efectos aleatorios de los años (2018 al 2024) y meses (ene a dic) sobre la CPUE en las operaciones de pesca de krill antártico. El panel izquierdo corresponde a la subárea 48.1 y el derecho a la subárea 48.2. Los puntos azules muestran los valores medios posteriores y las barras indican los intervalos de credibilidad del 95 %.....58

Figura 6. Campo espacial del efecto aleatorio anual sobre la tasa de captura (log Cpue) en la subárea estadística 48.1, durante las operaciones de pesca de krill antártico para el periodo 2018-2024. Los colores indican el valor del efecto posterior medio y los puntos representan los lances agrupados en oportunidades de pesca recurrentes (D, E y F).....59

Figura 7. Desviación estándar posterior del campo espacial anual en la subárea estadística 48.1, correspondiente a la incertidumbre del efecto aleatorio estimado sobre la CPUE. Los puntos representan los lances agrupados en oportunidades de pesca recurrentes (D, E y F).....60

Figura 8. Campo espacial del efecto aleatorio anual sobre la tasa de captura (log Cpue) en la subárea estadística 48.2, durante las operaciones de pesca de krill antártico para el periodo 2018-2024. Los colores indican el valor del efecto posterior medio y los puntos representan los lances agrupados en oportunidades de pesca recurrentes (A, B, C y G).....62

Figura 9. Desviación estándar posterior del campo espacial anual en la subárea estadística 48.2, correspondiente a la incertidumbre del efecto aleatorio estimado sobre la CPUE. Los puntos representan los lances agrupados en oportunidades de pesca recurrentes (A, B, C y G).....62



ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

Table 1. Characteristics and classification of fishing opportunities in terms of number of hauls, average CPUE (kg/h), catch of bycatch (kg), latitudes and longitudes centroids, average trawl depth, average temperature (°C), number of male, female, juvenile and gravid female specimens (n). Classification of recurrent, sporadic and unusual fishing opportunities.....25

Table 2. Composition bycatch present in the total catches obtained in the Antarctic krill (*E. superba*) fishery by recurrent fishing opportunities.....28

CAPÍTULO II

Tabla 1. Resumen de los principales parámetros del mejor modelo m2 en las subáreas estadísticas 48.1 y 48.2. Se presenta el valor del intercepto (media), el rango espacial (en kilómetros) y la desviación estándar, correlación temporal del campo espacial, así como las métricas de ajuste del modelo: la log-verosimilitud marginal (log-likelihood), criterio de información de deviance (dic) y criterio de información de watanabe-akaike (waic).53

RESUMEN

La pesquería de krill antártico (*Euphausia superba*) ha mostrado una creciente concentración espacial y temporal en el Océano Austral, lo que podría afectar la disponibilidad de alimento para especies dependientes. El presente estudio evaluó la variabilidad espacial y temporal de la captura por unidad de esfuerzo en oportunidades de pesca identificadas mediante un análisis de agrupamiento jerárquico aplicado a lances registrados en las subáreas estadísticas 48.1, 48.2 y 48.3 entre los años 2017 y 2024. Se identificaron 27 oportunidades de pesca, clasificadas como inusuales, esporádicas o recurrentes según su frecuencia de uso y cobertura temporal. Las oportunidades recurrentes ($n = 7$) se localizaron principalmente en el Estrecho de Bransfield (48.1) y las islas Orcadas del Sur (48.2), y fueron analizadas mediante análisis de correspondencia para caracterizar la fauna acompañante, estructura poblacional del krill y variables ambientales/operativas asociadas a la captura. Los resultados evidenciaron asociaciones específicas entre oportunidades de pesca y composición de la fauna acompañante y diferencias en la estructura poblacional, entre subárea. Finalmente, se observó una tendencia decreciente de la CPUE en dos oportunidades recurrentes. Estos Hallazgos aportan evidencia para mejorar la comprensión de la dinámica espacial y temporal de la pesquería, la influencia de variables ambientales y operativas sobre el comportamiento de los buques.

ABSTRACT

The Antarctic krill (*Euphausia superba*) fishery has shown an increasing spatial and temporal concentration in areas of the Southern Ocean, which could affect food availability for dependent species. The present study evaluated the spatiotemporal variability of catch per unit effort of fishing opportunities identified through a hierarchical clustering analysis applied to hauls recorded in statistical subareas 48.1, 48.2 and 48.3 between the years 2017 and 2024. Twenty-seven fishing opportunities were identified, classified as unusual, sporadic or recurrent according to their frequency of use and temporal coverage. Recurrent opportunities (n = 7) were mainly located in Bransfield Strait (48.1) and South Orkney Islands (48.2) and were analyzed using correspondence analysis to characterize bycatch. In addition, proportions of gravid females and juveniles were estimated as indicators of potential breeding and recruitment areas. The results showed specific associations between fishing opportunities and bycatch composition, as well as a high proportion of juveniles in Bransfield and gravid females in Orkney islands. Finally, a decreasing CPUE trend was observed on two recurring occasions. These findings provide relevant evidence for the design of more sustainable spatial management strategies in the Antarctic krill fishery.

INTRODUCCIÓN

El krill antártico (*Euphausia superba*) es una de las especies de crustáceos más abundantes en el océano Austral, de pequeño tamaño y estenotermo con tolerancia y adaptación a aguas frías (Atkinson *et al.*, 2006 ; Tarling *et al.*, 2006). Tiene una amplia distribución circumpolar antártica, con una mayor concentración en el sector del Atlántico sudoccidental (alrededor de la Península Antártica, al norte de las Islas Shetland del sur, Islas Orcadas del Sur e Islas Georgias del Sur) (Siegel & Watkins 2016; Santa Cruz *et al.*, 2022). Esta especie juega un rol clave en los ecosistemas, modulando el flujo de energía entre los herbívoros de nivel trófico inferior y depredadores (Murphy *et al.*, 2007), al ser presa principal de pingüinos, ballenas, focas, aves marinas y peces (Hill *et al.*, 2016; Santa Cruz *et al.*, 2018). Estas características determinan que el krill sea el vínculo directo entre la producción primaria y niveles tróficos superiores, estructurando el ecosistema (Alonzo *et al.*, 2003; Nicol, 2006; Stowasser *et al.*, 2012).

El krill antártico forma grandes agregaciones, lo que, sumado a su valor nutricional, lo convierte en una fuente relevante de proteína tanto para consumo animal como humano (Nicol & Foster, 2003; Kawaguchi & Nicol, 2020). Estas características lo han posicionado como especie objetivo de una de las pesquerías más importante de este océano (Nicol *et al.*, 2012; Hill *et al.*, 2019). En sus inicios la pesquería de krill comenzó con fines exploratorios en 1961-1962, en cantidades poco relevantes (<500 t), realizada principalmente por barcos de la ex-URSS (Nicol & Endo 1997). A finales de 1970 y principios de 1980 se produjo un rápido aumento en el esfuerzo pesquero, pasando de una

fase exploratoria a una fase de desarrollo (Nicol & Endo 1999), alcanzando en 1986 un total de 425.867 t. Posteriormente de 1993, las cifras de captura mostraron una fuerte disminución, con valores que varían entre 80.800 y 156.000 t año⁻¹ (Arana *et al.*, 2020) la cual se atribuyó a dificultades técnicas y la desintegración de la Unión Soviética (Nicol & Endo 1999; CCAMLR, 2022). Desde el 2009 hasta la actualidad las capturas han aumentado rápidamente alcanzando un registro de 498.350 t en el año 2020. Esta fase se asocia con el ingreso a la pesquería de empresas noruegas y chinas (CCAMLR, 2024). Desde los inicios de la pesquería los barcos compiten por obtener las mayores capturas posible dentro de la cuota anual asignada (Trathan, 2025).

La pesquería de krill se lleva a cabo mediante buques arrastreros pelágicos. Las redes de arrastre de media agua, pueden tener una apertura horizontal de 60 m y una apertura vertical aproximada de 50 m, aunque esto puede variar según el tipo de embarcación. La duración del arrastre puede extenderse por varias horas, dependiendo de la distribución y densidad de las agregaciones de krill. En situaciones donde las agregaciones son dispersas, los barcos suelen prolongar el arrastre, mientras que en zonas con agregaciones más densas la duración del arrastre tiende a ser menor. A partir del año 2006, los buques noruegos adoptaron una técnica conocida como arrastre continuo. En este método, en el que el krill capturado se extrae directamente del copo de la red mediante una bomba de succión, sin necesidad de recoger/virar la red. Esto permite a los barcos operar con arrastres durante 24 horas (Kawaguchi & Candy 2009), aumentando la eficiencia de pesca (Nicol *et al.*, 2012).

Actualmente diversos países participan en la pesquería de krill, entre los que se incluyen Chile, China, Corea, Noruega, Rusia y Ucrania. Este esfuerzo conjunto resalta la importancia global de la pesca de krill y la relevancia que tiene en la economía y seguridad alimentaria. Además, es importante destacar que esta actividad cuenta con la participación de 14 buques que operan en la Antártica, lo que subraya el alcance de esta actividad en la región (CCAMLR, 2025).

El periodo de pesca se extiende desde el 1 de diciembre y finaliza el 30 de noviembre del año siguiente. En los primeros años de la pesquería, la mayor actividad se registraba en verano y otoño, con capturas más bajas en primavera. Sin embargo, en los últimos años se ha observado una tendencia histórica distinta con capturas más bajas durante el verano y aumentando hacia finales del otoño, con poca actividad pesquera en primavera. Aunque, en el último año las mayores capturas se registraron en los meses de febrero-abril (Nicol & Foster 2016; CCAMLR, 2025). En general, las tendencias pesqueras espaciotemporales contemporáneas indican que la flota pesquera comienza la temporada frente a las Islas Orcadas del Sur (Subárea 48.2), antes de adentrarse en el norte de la Península Antártica (Subárea 48.1) en otoño y finalizar la temporada frente a la costa de Isla Georgia del Sur (Subárea 48.3) en invierno (Deehr *et al.*, 2024). Estos cambios temporales y espaciales han dado lugar a un patrón de actividad pesquera que se extiende a lo largo de casi todo el año, lo que ha provocado una reconfiguración en la distribución de los caladeros (Santa Cruz *et al.*, 2018; Santa Cruz *et al.*, 2022). Este fenómeno puede atribuirse, en parte, a la reducción de la cobertura de hielo en la región de la Península Antártica (Kawaguchi & Nicol, 2007; Nicol *et al.*, 2012; Kawaguchi & Nicol, 2020).

Regulación de la pesquería

La pesquería de krill ha sido documentada desde 1973, aunque fue en 1980 cuando se estableció la Comisión para la Conservación de Recursos Vivos Marinos Antárticos (CCAMLR, por sus siglas en inglés), la cual entro en vigor dos años más tarde. Esta comisión fue creada con el propósito de administrar las pesquerías en el océano austral, reconociendo la importancia del krill antártico en dicho ecosistema y la repercusión que tendría la reducción drástica en el tamaño de las poblaciones de krill sobre las poblaciones de depredadores (Nicol & Foster 2016).

Sin embargo, no fue hasta principios de la década de 1990 cuando CCAMLR inicio el proceso de regulación de la pesquería de krill (Nicol, 1992). Desde entonces, se ha avanzado gradualmente en la implementación de medidas de conservación que abordan diversos aspectos, adaptando un enfoque precautorio y ecosistémico para la regulación de esta y otras pesquerías (Nicol & Foster 2016). Este enfoque integra elementos bióticos y abióticos, con el objetivo de comprender el impacto de la pesca sobre el ecosistema (Browman *et al.*, 2004; Deehr *et al.*, 2024).

Los objetivos principales en la ordenación de la pesquería de krill son: (i) evitar una disminución significativa del total de su biomasa, asegurando un nivel en donde no se vea afectada la población, y (ii) garantizar que haya una biomasa adecuada de krill para satisfacer las necesidades de las especies afines y dependientes (Costable *et al.*, 2000; Grant *et al.*, 2013). En línea con estos principios, en 2019 la CCAMLR acordó desarrollar y avanzar hacia un enfoque de gestión basada en ecosistemas, incluyendo 3 componentes

claves: (i) estimación de biomasa, (ii) evaluación de stock y (iii) análisis de superposición espacial de los impactos potenciales de la actividad pesquera (SC-CAMLR, 2019).

Para facilitar la gestión de la pesquería CCAMLR ha dividido sus áreas de jurisdicción conforme a las áreas estadísticas definidas por la FAO (área 48). En este contexto, CCAMLR estableció un límite de captura de 5,61 millones de toneladas por temporada de pesca, correspondiente a la suma total permitida entre las subáreas estadísticas 48.1 a la 48.4. Sin embargo, para evitar posibles efectos negativos en la población de krill y los depredadores dependientes del krill, la CCAMLR estableció un límite de captura anual precautorio fijo para el sector del Atlántico de 620,000 t (denominado *trigger level*, medida de conservación CM 51-01) (Krafft *et al.* 2021; Kraft *et al.*, 2023 b).

Este límite de captura se distribuía entre subáreas mediante la Medida de Conservación 51-07 (Lista de Medidas de Conservación 2023/24). No obstante, debido a la falta de consenso entre los miembros de la Comisión para renovar dicha medida, su vigencia expiró al término de la temporada de pesca 2023/2024 (SC-CAMLR, 2024). En consecuencia, y hasta que se acuerde un nuevo mecanismo de distribución espacial de la captura, el límite provisional o nivel de activación es de 620,000 toneladas, que pueden ser capturadas en cualquiera de las subáreas desde la 48.1 hasta la 48.4 (Freer *et al.*, 2025). En la temporada 2024/2025, este nivel fue alcanzado por primera vez en la historia de la pesquería, registrándose la mayor parte de las capturas en la Subárea 48.1.

A medida que la pesquería se ha desarrollado, la ubicación de la pesca se ha trasladado del océano Índico al océano Atlántico, donde operan actualmente los barcos (CCAMLR,

2025). Sin embargo, la pesquería de krill antártico tiende a asociarse con los principales grupos de islas y no se distribuye homogéneamente en cada área estadística, ya que la mayor parte de las capturas provienen de la plataforma continental, el borde de la plataforma de hielo, en el talud continental y en áreas del frente oceánico (Everson & Gos 1991; Medley *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2025). En la actualidad existen tres caladeros principales: Estrecho de Bransfield en la Península Antártica (48.1), las Islas Orcadas del Sur (48.2) e Isla Georgia del Sur (48.3) (CCAMLR, 2020).

En los últimos años se ha mostrado una creciente preocupación, porque la distribución de los esfuerzos pesqueros ha aumentado y se ha concentrado en sitios específicos a escala local (Santa Cruz *et al.*, 2022) particularmente en el Estrecho de Bransfield e Islas Orcadas del Sur. Estas zonas albergan numerosas especies antárticas que coexisten y se alimentan del krill (Santa Cruz *et al.*, 2018; Arana *et al.*, 2020; Santa Cruz *et al.*, 2022), la superposición directa entre depredadores dependientes del krill y la pesquería resalta el potencial de interacción competitiva (Cavanagh *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2025) un efecto ya registrado en las poblaciones de pingüinos barbijo y papúa (Krüger *et al.*, 2021). La flota opera de forma altamente agregada, concentrado su actividad en pequeñas escalas espaciotemporales en puntos críticos en donde se ha registrado agotamiento local en sectores como el Estrecho de Bransfield (Santa-Cruz *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2025).

Históricamente, la principal temporada de pesca solía ser verano, pero más recientemente las operaciones durante todo el año se han vuelto más comunes en gran parte como resultado de la reducción de hielo en la región de la Península Antártica (Kawaguchi &

Nicol 2007; Nicol *et al.*, 2012; Kawaguchi & Nicol 2020). Dado lo anterior, han estado ocurriendo cambios en los caladeros de pesca debido a que las zonas que antes presentaban cobertura de hielo actualmente son de libre acceso para los barcos arrastreros (Nicol *et al.*, 2012; Santa Cruz *et al.*, 2018).

Este escenario ha generado cuestionamiento sobre si las medidas implementadas por CCAMLR cumplen la función de precautorias (Hill, 2016), principalmente porque el nivel crítico de captura está determinado sin considerar la variabilidad climática (disminución de hielo y aumento de la temperatura del océano) (Testa *et al.*, 2022) y la productividad del krill (Santa Cruz *et al.*, 2022). El aumento de temperatura del océano ha modificado la disponibilidad y el hábitat del krill. Entre los efectos más relevantes se encuentra: i) la reducción en la extensión y la estructura del hielo marino, elementos esenciales para la supervivencia larval y el reclutamiento (Atkinson *et al.*, 2019; Veytia *et al.*, 2021), ii) alteración en la disponibilidad y calidad del fitoplancton, su principal alimento (Hayward *et al.*, 2025) y iii) la contracción de la población local hacia el sur a lo largo de la Península Antártica, posiblemente reduciendo su abundancia en sectores (Atkinson *et al.*, 2019; Kawaguchi *et al.*, 2024). Como consecuencia de estos cambios, en algunas áreas se ha registrado un aumento en la presencia de salpas (*Salpa thompsoni*) (Plum *et al.*, 2020; Walter *et al.*, 2023). La influencia de estos factores ambientales, juntos con los impactos de un clima cambiante, están produciendo cambios en las agregaciones y patrones de distribución a nivel global (Perry *et al.*, 2005; Nye *et al.*, 2009; Pinsky & Fogarty 2012), lo que repercute en la disponibilidad de nuevas zonas de pesca que pudiesen ser utilizadas por los pescadores como caladeros de pesca.

Definición de caladero de pesca

El término caladero de pesca se utiliza con un sentido amplio, pero carece de una definición específica universalmente aceptada (Ball *et al.*, 2002; Russo *et al.*, 2013; Campbell *et al.*, 2014; Norway 2020). En general, los caladeros de pesca se identifican por los pescadores, como zonas conocidas donde una especie objetivo se agrega y donde es posible aplicar un esfuerzo de pesca eficiente, minimizando los costos y riesgos involucrados (Russo *et al.*, 2013). Sin embargo, pueden surgir circunstancias que obliguen a los pescadores a aplicar el esfuerzo de pesca en zonas menos conocidas, inicialmente de manera esporádica, ya sea debido al agotamiento local del recurso, estacionalidad, cambios en las condiciones ambientales, costos, o regulaciones y restricciones a la actividad pesquera. Además, los pescadores pueden emplear tácticas de pesca que implican la selección de una zona donde ejercer el esfuerzo pesquero pudiese estar influenciado por la interacción con otros participantes de la pesquería (Hicks *et al.*, 2012).

Los métodos utilizados para definir los caladeros dependen de los distintos tipos de artes y aparejos de pesca utilizados, y la dinámica de cada pesquería, influyendo el tamaño, forma y sobreposición con otros caladeros o usos del espacio marítimo (Jennings & Lee 2012). Además, la metodología utilizada influye si los caladeros definidos reflejan la dinámica temporal de la actividad pesquera.

Para identificar caladeros de pesca recurrentes de aquellos esporádicos, se emplean una variedad de métodos y a menudo procedimientos ad-hoc, que aprovechan tanto el conocimiento de los pescadores a partir de bitácoras de pesca como datos científicos

generados por observadores científicos a bordo. Los métodos pueden variar en su enfoque y resolución, pero comparten el objetivo de delimitar áreas donde las especies objetivo se concentran de manera consistente.

El análisis espacial de la actividad pesquera es una herramienta utilizada para identificar donde se concentra el esfuerzo de pesca, permitiendo delimitar los caladeros. Jennings & Lee (2012) propusieron un enfoque para evaluar la extensión espacial de los caladeros que, además de identificar las zonas más productivas, permite comprender los cambios en la distribución de las embarcaciones. Este método considera la contribución anual del esfuerzo pesquero realizada por cada embarcación y los desembarques, ordenando las zonas de pesca de mayor a menor actividad. A partir de este ordenamiento, se establecen límites que abarcan distintas proporciones de la actividad total (70%, 80% y 90%) permitiendo definir las zonas de pesca más importantes.

La identificación de zonas de pesca se apoya en datos obtenidos mediante sistema de vigilancia satelital o de monitoreo de embarcaciones (VMS), que registran el despliegue espacial del esfuerzo pesquero. Estos datos, combinados con métodos de clasificación o modelos de distribución como los modelos aditivos generalizados, facilitan la detección de zonas de alta concentración de la especie objetivo (Maina *et al.*, 2016) permitiendo determinar caladeros de pesca (Maina *et al.*, 2016). Asimismo, la integración de conocimiento histórico y monitoreo a bordo constituyen una herramienta complementaria. Este enfoque combina entrevistas a capitanes con datos de VMS para identificar la

distribución del esfuerzo pesquero y localizar los caladeros más importantes (Demestre *et al.*, 2015)

En la pesquería de krill (*Euphausia superba*), Ball *et al.* (2002) propusieron un método para delimitar espacialmente los caladeros de pesca a partir de la identificación de zonas que mantiene una alta productividad de forma constante a lo largo del tiempo. La idea central es que un caladero no se define únicamente por capturas elevadas en un momento determinado, sino por su importancia y la estabilidad en el tiempo.

Para evaluar la persistencia, se utiliza un indicador denominado “captura promedio normalizada a largo plazo”. Este valor corresponde a la cantidad media de krill capturado en una zona específica, ajustada de manera que puede compararse entre distintos años y flotas pesqueras. La estandarización de la captura se realiza siguiendo seis principios: i) Variación estacional, las capturas deben reflejar los cambios en disponibilidad del krill a lo largo del año, ya que esta especie presenta fluctuaciones estacionales, ii) variación anual, se ajusta por las diferencias en abundancia de un año a otro, evitando que un único año excepcionalmente productivo distorsione los resultados, iii) diferencias entre flotas, se corrigen las capturas para tener en cuenta el esfuerzo y las características de cada flota nacional, iv) conocimiento del recurso, se considera que, con el tiempo, las flotas adquieren experiencia sobre la distribución del krill, por lo que se eliminan sesgos de áreas exploradas o de embarcaciones nuevas, v) variación temporal y tecnológica, se controla el efecto de cambios en la disponibilidad del recurso o en la tecnología de pesca utilizada y vi) claridad y robustez, el método y los umbrales empleados deben ser explícitos y

estables, de forma que pequeñas variaciones en el procedimiento no alteren significativamente los resultados. Este método permite diferenciar las zonas que son productivas y estables en el tiempo de aquellas que solo presentan rendimientos altos de manera puntual.

Branch *et al.* (2005) propusieron un método para identificar oportunidades de pesca basado en el cálculo de distancias euclidianas entre lances de pesca. Este enfoque permite diferenciar entre lances exploratorios y aquellos que se agrupan en una misma zona de pesca, lo que posibilita una delimitación espacial más precisa de las áreas utilizadas por la flota, en contraste con representaciones basadas en grilla o áreas estadísticas. De esta manera se evalúa la probabilidad de que cada lance realizado por una flota resulte en una oportunidad de pesca exitosa.

En este método, una oportunidad de pesca se define como un área pequeña en la que un buque realiza lances de manera frecuente. Para determinar si distintos lances corresponden a una oportunidad de pesca, se considera tanto la posición inicial como la final. Si dos lances tienen posición inicial y final próximas, aunque se realicen en direcciones opuesta pertenecerán a la misma oportunidad de pesca, ya que indica que el buque está operando en la misma zona. Por el contrario, si dos lances parten de posiciones cercanas, pero se dirigen a puntos finales muy diferentes, va a pertenecer a otra oportunidad de pesca. Esta evaluación se realiza calculando la distancia euclidiana entre los lances realizados y agrupándolos en clúster que representan zonas de operación

espacialmente recurrentes, caracterizadas por sus perfiles de captura y atributos (Cubillos *et al.*, 2022).

Por otro lado, si bien los métodos de vigilancia satelital (VMS) son útiles para identificar y comparar zonas de pesca, carecen de las características operacionales asociadas a cada lance de pesca. En contraposición, el uso de sistemas de posicionamiento global y sistemas de monitoreo a bordo realizados por observadores científicos ofrece una mayor resolución espacial y considera las características del entorno ambiental y modalidades de pesca, lo que permite inferir patrones de distinción bajo un campo espacial constante (zonas recurrentes), cambiante con diferentes realizaciones anuales (esporádico), o temporalmente correlacionado o progresivos, donde los caladeros de pesca pueden persistir de una estación de pesca a la próxima (Paradinas *et al.*, 2017).

En este contexto, y con el objeto de comprender cómo se desarrolla las operaciones de pesca de krill antártico, se plantea la importancia de identificar, delimitar y caracterizar caladeros de pesca en base a oportunidades de pesca recurrentes y esporádicas. Esto implica no solo agrupar lances con características similares bajo el concepto de oportunidad de pesca, sino también considerar la continuidad temporal y espacial de las agregaciones de lances, donde la recurrencia podría implicar un campo espaciotemporal progresivo (autoregresivo temporalmente), mientras los caladeros esporádicos se caracterizan por una distribución irregular o realización independiente de agregaciones de lances.

En este sentido, el presente trabajo busca identificar y delimitar oportunidades de pesca que se conforman recurrentemente en la pesquería de krill, evaluar la influencia de factores ambientales (temperatura y profundidad) y operacionales (distancia de arrastre, rumbo, velocidad de arrastre y fuerza del viento), comparar las variaciones espaciotemporales de las oportunidades de pesca en la pesquería de krill. Se espera proporcionar información relevante para una mejor gestión y manejo del recurso pesquero asegurando su sostenibilidad a largo plazo.



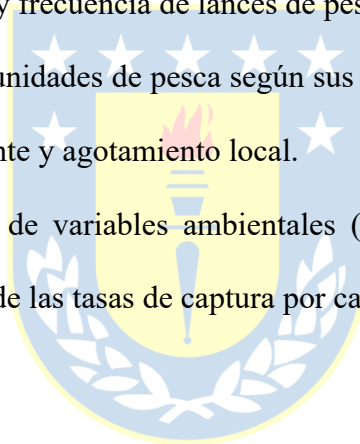
OBJETIVOS

Objetivo General

Identificar y determinar las oportunidades de pesca recurrentes y esporádicas en los caladeros de krill antártico a partir de datos operacionales.

Objetivos específicos

1. Identificar y delimitar las oportunidades de pesca en la pesquería de krill antártico.
2. Determinar oportunidades de pesca recurrentes y esporádicos a partir de la persistencia temporal y frecuencia de lances de pesca de krill antártico.
3. Caracterizar las oportunidades de pesca según sus tasas de capturas, composición de la fauna acompañante y agotamiento local.
4. Evaluar la influencia de variables ambientales (temperatura y profundidad) y cambios interanuales de las tasas de captura por caladeros de pesca.



HIPÓTESIS

H1: Las operaciones de pesca sobre krill antártico se estructuran espacialmente en oportunidades de pesca, y aquellas recurrentes temporalmente determinan tasas de captura más altas, y una composición de fauna acompañante y condiciones ambientales diferentes de aquellas oportunidades de pesca esporádicas.



CAPÍTULO I

Identification and Characterization of Antarctic Krill (*Euphausia superba* Dana, 1850) Fishing Grounds Based on Fishing Opportunities in Subareas 48.1 and 48.2

Gabriela Torretti¹, Luis A. Cubillos^{1,2,*}

¹Magister en Ciencias mención Pesquerías, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

²COPAS Coastal, Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Casilla 150-C, Concepción, Chile

*Corresponding author: Email: gtorretti@udec.cl



Abstract

The Antarctic krill (*Euphausia superba*) fishery is primarily concentrated along the slopes and continental shelves of the major island groups. Climate-induced sea ice retreat has recently expanded fishing access to previously inaccessible areas, altering spatial fishing patterns. Given that krill distribution strongly influences fishing tactics, it is critical to identify fishing grounds based on where and how vessels operate, particularly within statistical subareas 48.1 and 48.2. In this study, we analyzed haul-by-haul fishing log data from 2017 to 2024 to identify and classify fishing opportunities (FOs) as recurrent, sporadic, or unusual. A hierarchical agglomerative clustering method was applied to midwater trawl positions, resulting in 27 distinct FOs. Recurrent FOs ($n = 7$) were defined as those with >50 hauls spanning most years and located in the Bransfield Strait (48.1, $n = 3$) and South Orkney Islands (48.2, $n = 4$). Multivariate correspondence analysis revealed distinct groupings in bycatch species composition across FOs. Furthermore, variations in the proportion of gravid females and juveniles helped identify areas relevant to krill reproduction and recruitment. CPUE trends across years indicated stable or declining yields, with evidence of local depletion in only two recurrent FOs. These findings highlight the importance of spatially explicit fishery analyses and support the development of fine-scale management strategies for Antarctic krill fisheries under changing environmental conditions.

Keywords: *Euphausia superba*, fishing opportunities, krill reproduction, CPUE, spatial clustering, Bransfield Strait, South Orkney Islands, spatial management

Introduction

Understanding the spatiotemporal behavior of krill fisheries provides critical insights into the interaction between human activity and ecological variability in the Southern Ocean. Distinguishing between recurrent and occasional fishing grounds and linking these patterns to catch characteristics and reproductive composition contributes to a more nuanced understanding of fishery dynamics. Such insights are essential for minimizing localized depletion, protecting krill-dependent species, and supporting the long-term sustainability of fisheries under changing environmental conditions.

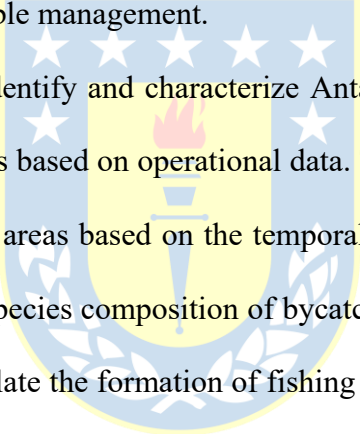
Although fishing grounds are widely used in the fisheries literature to describe locations where fishers operate, the concept often lacks a universally accepted definition (Ball et al., 2002; Des Clers et al., 2008; Russo et al., 2013; Campbell et al., 2014; Norway, 2017). In general, fishers identify fishing grounds as areas where the target species aggregate, and where it is possible to apply an efficient fishing effort, minimizing the costs and risks involved (Russo et al., 2013). However, various factors may lead fishers to explore and exploit less familiar areas, initially on a sporadic basis, due to local depletion of the target species, changes in environmental conditions, costs, or regulations and restrictions on fishing activities. Moreover, fishers may employ fishing tactics that involve selecting an area in which to concentrate their fishing efforts, which could be influenced by interactions with other fishery participants (Hicks *et al.*, 2012).

The Antarctic krill fishery has undergone changes since its inception in the Southern Ocean. Historically, fishing has been concentrated in the summer months, and in recent decades, operations have extended throughout the year, mainly due to the reduction of ice

in the Antarctic Peninsula region (Kawaguchi & Nicol 2007; Nicol *et al.*, 2012; Kawaguchi & Nicol 2020). This transformation has led to changes in the spatial distribution of fishing activities, allowing trawlers to access new areas that were previously inaccessible (Nicol *et al.*, 2012; Santa Cruz *et al.*, 2018). Globally, environmental influences, through the impacts of a changing climate, produce shifts in aggregations and distribution patterns (Perry *et al.*, 2005; Nye *et al.*, 2009; Pinsky & Fogarty 2012), which affects the availability of new fishing opportunities and leads to modifications in the structure of traditional fishing grounds.

The Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCAMLR) was established in 1980 to manage Antarctic krill fisheries and came into force in 1982. The CCAMLR sets an allowable catch limit of 620,000 tons per fishing season, as a combined catch for Statistical Subareas 48.1 to 48.4, as a precautionary approach. CCAMLR is working to allocate a total allowable catch (TAC) among smaller management units based on advice from the Scientific Committee. Currently, fishing is concentrated in three main areas: the South Shetland Islands (48.1), South Orkney Islands (48.2), and South Georgia Island (48.3) (CCAMLR, 2020). With the development of fisheries, the location of fishing operations has shifted from the Indian Ocean to the Atlantic Ocean, where vessels currently operate (CCAMLR 2023). However, Antarctic krill fisheries tend to be associated with the main island groups and are not distributed homogeneously in each statistical area because most of the fishing effort is deployed on slopes and continental shelves (Everson & Gos 1991; Medley *et al.*, 2009).

In recent years, there has been growing concern about the concentration of fishing efforts in specific regions of the Bransfield Strait and South Orkney Islands, where numerous Antarctic species that feed on krill coexist (Santa Cruz et al., 2018; Arana et al., 2020; Santa Cruz et al., 2022). Thus, concentrated fishing efforts in limited areas of the Antarctic krill fishery, especially in regions where krill-dependent predators aggregate, raise concerns regarding local depletion and ecosystem impacts. However, there is currently a lack of robust analysis to identify which fishing areas are persistently used and which are opportunistically exploited. This gap hinders our ability to assess fishery pressures and their implications for sustainable management.



The present study aimed to identify and characterize Antarctic krill fishing grounds by analyzing fishing opportunities based on operational data. The objective was to delineate both recurrent and occasional areas based on the temporal persistence and frequency of fishing hauls, evaluating the species composition of bycatch and the population structure of krill as variables that modulate the formation of fishing grounds. This study evaluated catch rate yields within fishing opportunities, making it possible to determine local depletion in time. This approach provides a foundation for improving the understanding of the spatial and temporal dynamics of krill fishery, contributing to informed decision-making for the management and sustainability of the resource.

Materials and Methods

Study area and data

We utilized fishing logs of the Chilean factory vessel Antarctic Endeavour during commercial Antarctic krill (*Euphausia superba*) fishing operations carried out in

statistical subareas 48.1 (Elephant Island, South Shetland Islands, Bransfield Strait), 48.2 (South Orkney Islands), and 48.3 (South Georgia) from 2017 to 2024 (Fig.1). The data had a haul-by-haul resolution and operational information, such as date, catch (tons), effort (trawl hours), and geographic location (latitude and longitude). The fishing hauls were conducted using a commercial Omega 200 net, which had a mouth opening 18 m high and 22 m wide, equipped with a 30 m long codend and a 16 mm mesh.

Data analysis and fishing opportunities

We applied the methodology described by Branch et al. (2005) to determine fishing opportunities (FO), consisting of similar located mid-trawl hauls by cluster analysis of individual fishing hauls. For this purpose, both the initial and final positions of a trawl are important when defining fishing opportunities. Euclidean distance was used to measure the geographic proximity of individual hauls. The Euclidean distance was defined as a combination of the distance between positions, using the initial latitudes and longitudes, as well as the final latitudes and longitudes (all in decimal degrees) of each haul. Before calculating the Euclidean distance, the longitudes were multiplied by the cosine of the mean latitude to ensure that the latitudes and longitudes were both in units the same. This is because the lines of longitude are closer together than the lines of latitude.

$$lon^{inicial} = lon^{inicial} \cos\left(\frac{lat^{inicial}}{360} 2\pi\right), lon^{final} = lon^{final} \cos\left(\frac{lat^{final}}{360} 2\pi\right)$$

Branch et al. (2005) switched positions to ensure that trawls conducted in opposite directions on the same ground were grouped together. However, there was no swapping of the starting and ending positions to orient trawls in the same direction. Even if two

identical hauls in opposite directions occur in the same fishing area, the goal is to distinguish fishing opportunities based on the fisher's strategy rather than whether they belong to the same fishing ground (Cubillos et al., 2022).

The hauls were grouped using an agglomerative hierarchical clustering technique based on Euclidean distance. To differentiate fishing opportunities in the cluster tree, we started with a cutting level of $h = 0.25$, as suggested by Branch et al. (2005), and iteratively set the cutting level to $h = 0.2$. This value balances the number of groups containing a single haul versus those containing more hauls. Isolated single-haul sets were reviewed to verify whether these sets contained errors in the starting and ending positions. Fishing opportunities were considered recurrent if they included more than 50 hauls and covered most years of the time series, sporadic if they had between 10 and 49 hauls, covered about half of the time series, and unusual if they had fewer than ten hauls and covered less than three years (Cubillos et al., 2022).

Characteristics of fishing opportunities and species composition in the bycatch

The fishing opportunities were classified according to the cumulative number of fishing hauls. The average spatial position of the fishing opportunity was obtained and a map was generated. The number of fishing hauls determines the spatial recurrence, and the number of years determines the temporal recurrence of each fishing opportunity (Cubillos et al., 2022). The characteristics of fishing opportunities included the number of hauls, trawl fishing hours, depth, temperature, catch, and bycatch.

The bycatch composition among the fishing opportunities was studied using the agglomerative hierarchical clustering (HAC) method in the statistics package (Venables

& Ripley 2002) for R. A distance matrix was used based on the percentage contribution of the bycatch of the total catch for each fishing opportunity. Additionally, a multivariate correspondence analysis technique was used to summarize the dimensions of the bycatch table and to visually compare the correspondence between fishing opportunities and species in the table of accompanying fauna. The correspondence analysis was based on the FactoMiner package (Husson et al., 2017; Lee et al., 2008) and factoextra (Kassambara and Mundt, 2016) for R (R Team, 2021).

Proportion of gravid females and juveniles

To analyze the variability in the proportion of gravid females and juveniles in recurrent fishing opportunities, two generalized linear models (GLM) with binomial distribution and logit link functions were used. Two independent models were used. The first analyzed the proportion of gravid females (PHG) in relation to the total number of females caught, while the second analyzed the proportion of juveniles (PJ) in relation to the total number of adults caught. The models were:

$$\log\left(\frac{P_{HGij}}{1 - P_{HGij}}\right) = \alpha + \beta_1 * OP_j + \beta_2 * A_i + B_3 * M_i + \varepsilon$$

$$\log\left(\frac{P_{Jij}}{1 - P_{Jij}}\right) = \alpha + \beta_1 * OP_j + \beta_2 * A_i + B_3 * M_i + \varepsilon$$

Where P_{HGij} is the proportion of gravid females in fishing opportunity j in year i . Mean while P_{Jij} is the proportion of juveniles in fishing opportunity (FO) j in the year i , A_i is the effect of year i , which captures interannual variability, and M_i represents the effect of month i , evaluating the seasonal influence on the population structure of Antarctic krill.

Catch per unit effort (CPUE)

The trend in catch per unit effort (CPUE) over time for each fishing opportunity was analyzed using the following general model:

$$Y_{i,j} = \alpha + \beta \cdot OP_j \cdot X_i + OP_j + \varepsilon$$

Where $Y_{i,j}$ represents the CPUE in year i during fishing opportunity j , α is the intercept, β is the slope, OP_j is fishing opportunity j , and X_i is the year.

The described model (M_1) allows for variations in both the intercept and slope for each fishing opportunity. Additionally, two alternative models were compared: one that considers only changes in the intercept (M_2) and another that allows for changes in the slope (M_3). A generalized linear model (GLM) with a gamma distribution and logarithmic function was used for fitting. The model selection was based on the Akaike Information Criterion (AIC) (Akaike, 1974), which evaluates the balance between fit and parsimony. In the models, year was treated as a sequential variable ($X_i = 1, 2, \dots, n$), subtracting 2018 from each year's value. This approach provided an estimate of the CPUE at the beginning of 2018 and its trend over time.

Results

We found 27 fishing opportunities located in the Bransfield Strait (48.1) and South Orkney Island (48.2) (Fig. 1). Of these, 7 corresponded to recurrent fishing opportunities (A-G), 11 were sporadic (H-Q), and 9 were unusual (S-AA) (Table 1). Recurrent fishing opportunities (RFO) were characterized by a higher number of hauls, ranging from 65 to 235, indicating frequent fishing activities. They showed higher average CPUE (kg/h)

values ranging from 5,479.4 to 8,839.1 (kg/h), making them more productive areas in terms of yield. Depths in these zones range from 53.95 m to 72.72 m, and their temperatures are between -0.16°C and -1.54°C. The amount of bycatch ranged from 13 kg to 7,725.95 kg. The composition of males and females in these opportunities ranged from 999 to 4,238 and 1,077 to 5,917 specimens, respectively (Table 1).

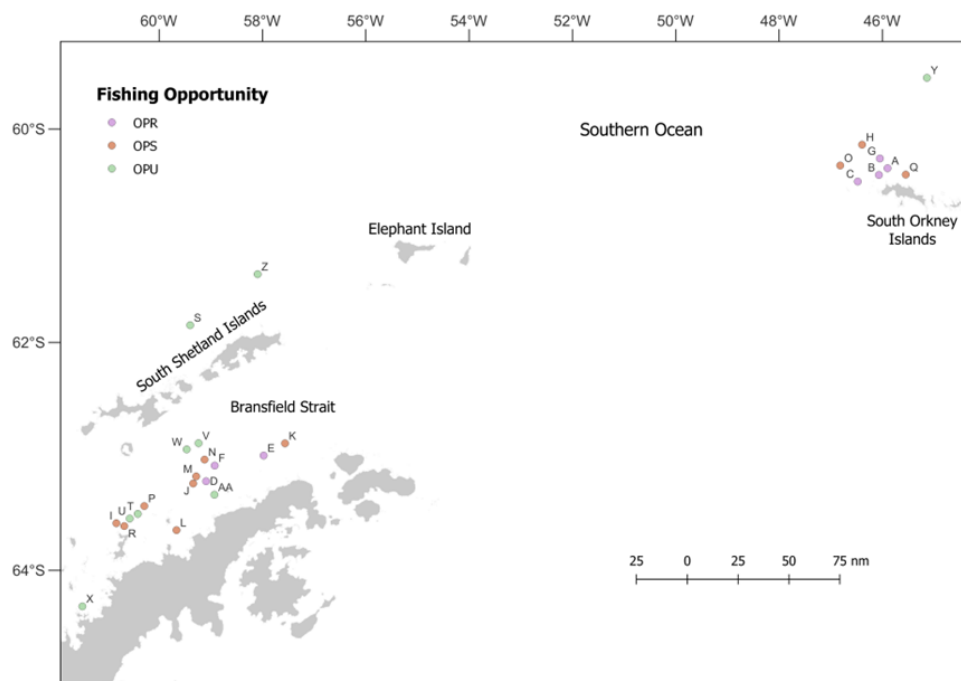


Figure 1. Distribution of recurrent (RPO) (more than 50 sets, covers all years), sporadic (SPO) (more than 10 sets less than 49 and covers half of the years) and unusual (UPO) (less than 10 sets and covers less than 3 years) fishing opportunities from 2017 to 2024.

Table 3. Characteristics and classification of fishing opportunities in terms of number of hauls, average CPUE (kg/h), bycatch (kg), latitudes and longitudes centroids, average trawl depth,

average temperature (°C), number of male, female, juvenile and gravid female specimens (n). Classification of recurrent, sporadic and unusual fishing opportunities.

Fishing Opportunity	Haul (n)	CPUE (kg/h)	Catch FA (kg)	Latitude	Longitude	Trawl Depth (m)	Mean T (°C)	Male (n)	Females (n)	Juveniles (n)	Gravid Female (n)	Classification
A	114	8,087	309	-60.38	-45.96	53.95	-0.16	1,502	2,183	107	323	Recurring
B	235	8,839	875	-60.44	-46.08	70.83	-0.28	4,238	5,917	246	507	Recurring
C	216	9,612	7,259	-60.50	-46.50	83.81	-1.24	1,583	1,975	48	351	Recurring
D	86	5,764	35	-63.23	-59.09	71.88	-1.23	1,936	2,288	147	10	Recurring
E	65	5,479	13	-63.01	-57.91	70.82	-1.54	999	1,075	135	1	Recurring
F	112	6,466	45	-63.10	-58.87	63.27	-1.15	1,682	1,840	361	17	Recurring
G	123	5,790	588	-60.28	-46.07	72.72	-0.15	1,764	2,841	194	631	Recurring
H	26	6,939	34	-60.15	-46.39	102.17	-0.20	547	610	43	6	Sporadic
I	25	5,286	8	-63.60	-60.83	57.92	-0.64	681	749	49	3	Sporadic
J	20	4,095	4	-63.25	-59.34	61.35	-1.02	398	355	62	3	Sporadic
K	20	7,043	1	-62.90	-57.57	46.03	-1.55	298	346	60	4	Sporadic
L	34	4,570	24	-63.66	-59.67	35.71	-0.60	734	906	62	0	Sporadic
M	47	7,243	1,203	-63.19	-59.28	133.55	-1.62	812	969	19	53	Sporadic
N	27	6,365	81	-63.05	-59.12	98.61	-1.60	537	607	66	3	Sporadic
O	17	6,211	2	-60.35	-46.82	42.74	-0.33	117	332	151	2	Sporadic
P	41	7,478	2	-63.45	-60.29	58.71	-0.83	224	357	5	50	Sporadic
Q	35	7,445	113	-60.44	-45.55	77.56	-0.12	449	751	0	16	Sporadic
R	13	5,010	3	-63.62	-60.68	65.08	-0.58	317	476	8	2	Sporadic
AA	5	3,664	1	-63.35	-58.93	81.70	-1.02	96	100	4	0	Unusual
S	5	2,033	0	-61.84	-59.40	22.70	0.24	181	208	11	0	Unusual
T	5	4,854	0	-63.52	-60.41	80.50	-1.54	190	183	27	0	Unusual
U	5	2,945	3	-63.56	-60.57	63.00	-1.22	0	0	0	0	Unusual
V	5	7,981	1	-62.90	-59.24	26.20	-1.38	121	73	7	0	Unusual
W	6	6,157	1	-62.96	-59.47	30.00	-1.37	206	156	37	0	Unusual
X	5	3,782	3	-64.30	-61.49	12.70	0.42	146	201	53	0	Unusual
Y	5	1,751	0	-59.50	-45.14	39.60	-0.06	90	110	0	85	Unusual
Z	5	4,820	0	-61.37	-58.10	20.30	0.82	148	252	0	0	Unusual

Species composition in the bycatch

The three recurring fishing opportunities are located in subareas 48.1 (E, F, and D) and four in 48.2 (A, B, C, and G) (Figure 2). The similarity in the species composition of the bycatch among these RFO showed two main groups: a) RFO A, B, C, and G, which showed high similarity and homogenous faunistic composition with common species (Figure 3); and b) RFO D, E, and F, whose characteristics differ from those of the first group (Figure 3).

Correspondence analysis complemented the dendrogram by highlighting the specific relationships between fishing opportunities and the dominant species in the bycatch. Fishing opportunity A was located in the lower right quadrant, suggesting that it presented distinctive fauna, mainly associated with the species *Neopagetopsis ionah* (JIC) (Figure 3), which showed the highest contribution to the composition of the bycatch (0.01412)

(Table 2). Fishing opportunities B, C, and G are located close to the origin of the biplot, indicating that their bycatch comprises a greater number of species, with no dominant one (Figure 3). However, they showed a greater contribution from *Champtocephalus gunnari* (ANI) (0.00852, 0.2069, and 0.01172, respectively), being highest in fishing opportunity C (Table 2). Fishing opportunity C was associated with the contribution of *Champtocephalus gunnari* (ANI), and fishing opportunities E, D, and F were closely associated with species, such as *Chinodraco rastrospinosus* (KIF) and *Gobionotothen gibberifrons* (NOG) (Figure 3). Fishing opportunity E showed a unique contribution from *C. rastrospinosus* (0.00143), whereas D and F showed contributions from *G. gibberifrons* (0.00032 and 0.00030, respectively) (Table 2). However, fishing opportunity F shared several species with fishing opportunities A, B, C, and G (Table 2, Figure 3).

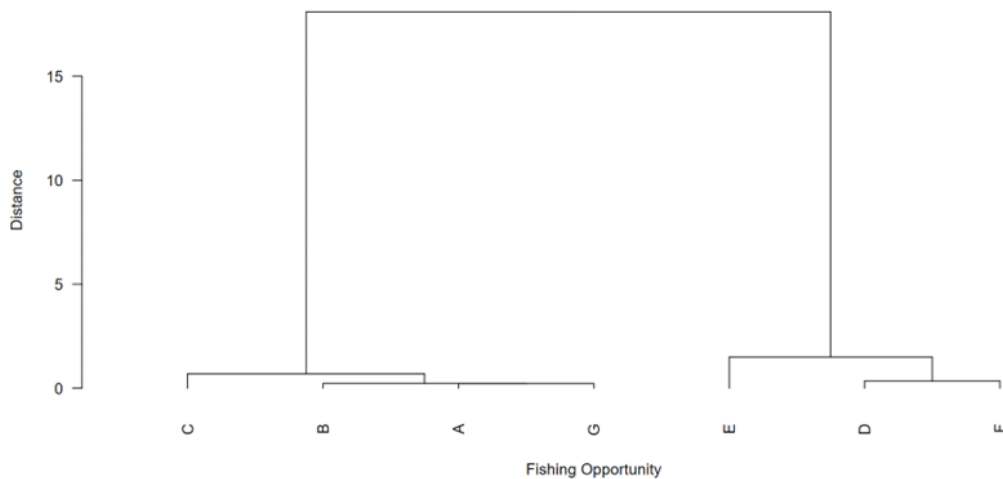


Figure 2. Dendrogram of the species composition present in the bycatch of the Antarctic krill (*Euphausia superba*) fishery in recurrent fishing opportunities.

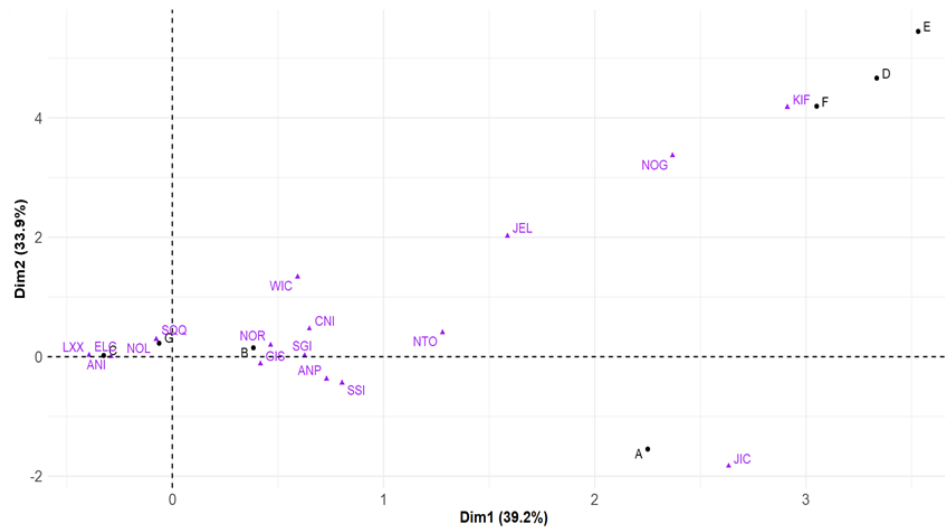


Figure 3. Correspondence analysis between the species composition of the bycatch in the total catches of the Antarctic krill fishery (*E. superba*) by recurrent fishing opportunities.

Table 4. Bycatch composition present in the total catches obtained in the Antarctic krill (*E. superba*) fishery by recurrent fishing opportunities.

Species	Code	Fishing Opportunity						
		A	B	C	D	E	F	G
Pisces								
<i>Anotopterus pharao</i>	ANP	0.00005	0	0	0	0	0	0.00012
<i>Champsocephalus gunnari</i>	ANI	0.00411	0.00852	0.20691	0	0	0	0.01172
<i>Notolepis coatsi</i>	NTO	0.00008	0.00004	0.00002	0.00004	0	0	0.00011
<i>Electrona carlsbergi</i>	ELC	0	0	0.00005	0	0	0	0
<i>Pseudochaenichthys georgianu</i>	SGI	0.00053	0.00615	0.00010	0	0	0	0.00004
<i>Chionodraco rastrospinosus</i>	KIF	0.00034	0.00051	0.00038	0.00116	0.00143	0.00102	0.00050
<i>Neopagetopsis ionah</i>	JIC	0.01412	0.00026	0.00024	0.00009	0	0.00009	0.00011
<i>Gobionotothen gibberifrons</i>	NOG	0.00003	0.00021	0.00020	0.00032	0	0.00030	0
<i>Nototheniops larseni</i>	NOL	0	0	0	0	0	0	0.00003
<i>Chaenodraco wilsoni</i>	WIC	0	0	0.00010	0	0	0.00003	0
<i>Notothenia rossi</i>	NOR	0	0.00006	0	0	0	0	0
<i>Chaenocephalus aceratus</i>	SSI	0.00141	0.00163	0.00192	0	0	0.00005	0.00002
Myctophidae	LXX	0	0	0.00005	0	0	0	0
Other taxas								
Teuthoidea	SQQ	0	0	0	0	0	0	0.00008
Cnidaria	CNI	0.00015	0	0.00002	0	0	0.00010	0.00082
Medusae	JEL	0	0.00005	0	0	0	0.00003	0
<i>Dosidicus gigas</i>	GIS	0.00007	0.00001	0.00001	0	0	0	0.00032

Proportion of gravid females

The model showed significant effects of fishing opportunity, year, and month on the variability in the proportion of gravid females ($\rho < 0.001$). At the spatial level, significant

differences were observed among the recurrent fishing opportunities. In particular, fishing opportunities C ($\beta = 0.356$, $\rho = 0.001$) and G ($\beta = 0.482$, $\rho < 0.001$) (Figure 4) had significantly higher proportions of gravid females compared to fishing opportunity A.

In terms of temporal variability, the proportion of gravid females varied significantly between months, with an increase observed in February ($\rho < 0.001$), while in March ($\beta = -0.290$, $\rho = 0.020$) and May ($\beta = -1.575$, $\rho = 0.037$), the proportion was significantly lower than that in January and February.

At the interannual level, 2024 showed a highly significant increase in the proportion of gravid females ($\beta = 2.407$, $\rho < 0.001$), while 2023 showed a significant decrease ($\beta = -1.353$, $\rho < 0.001$) (Figure 4). No significant differences were detected between 2021 and 2022.



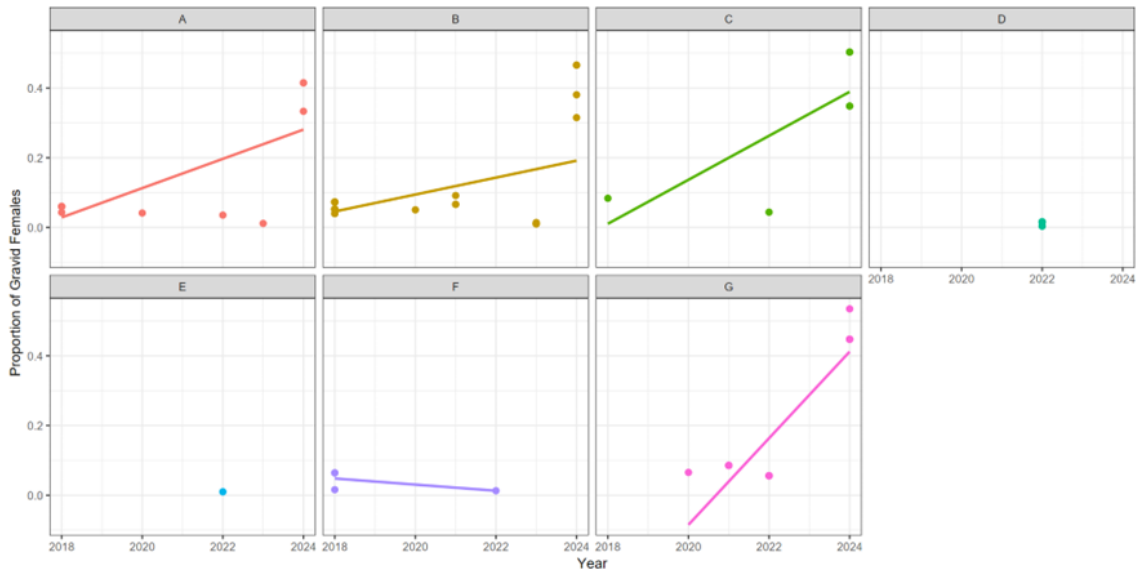


Figure 4. Proportion of gravid females per year in each recurrent fishing opportunity in the Antarctic krill fishery.

Proportion juveniles

In general, the proportion of juveniles varies among recurrent fishing opportunities over the years. The results indicate significant differences in the proportion of juveniles. In particular fishing opportunities D, E and F present positive and significant coefficients ($\rho < 0.001$), suggesting a higher proportion of juveniles in these opportunities compared to fishing opportunity A (Figure 5). In contrast, fishing opportunities B, C and G show no significant differences.

At the temporal level, the results indicate significant variability in the proportion of juveniles between months and years. The proportion of juveniles was lower in the months of February, March, April, May and June with negative and significant coefficients ($\rho < 0.001$), while December presents a positive coefficient ($\rho < 0.001$), suggesting a higher proportion of juveniles.

Regarding interannual variability, a significant reduction of juveniles is observed in the years 2020, 2021 and 2023 ($\rho < 0.001$) (Figure 5), while the year 2024 there is a higher proportion of juveniles compared to 2018 ($\rho < 0.001$).

Some fishing opportunities show a more marked trend over time (F and G, with an increasing trend of juveniles). While E, the proportion of juveniles seems to decrease over time (Figure 5).

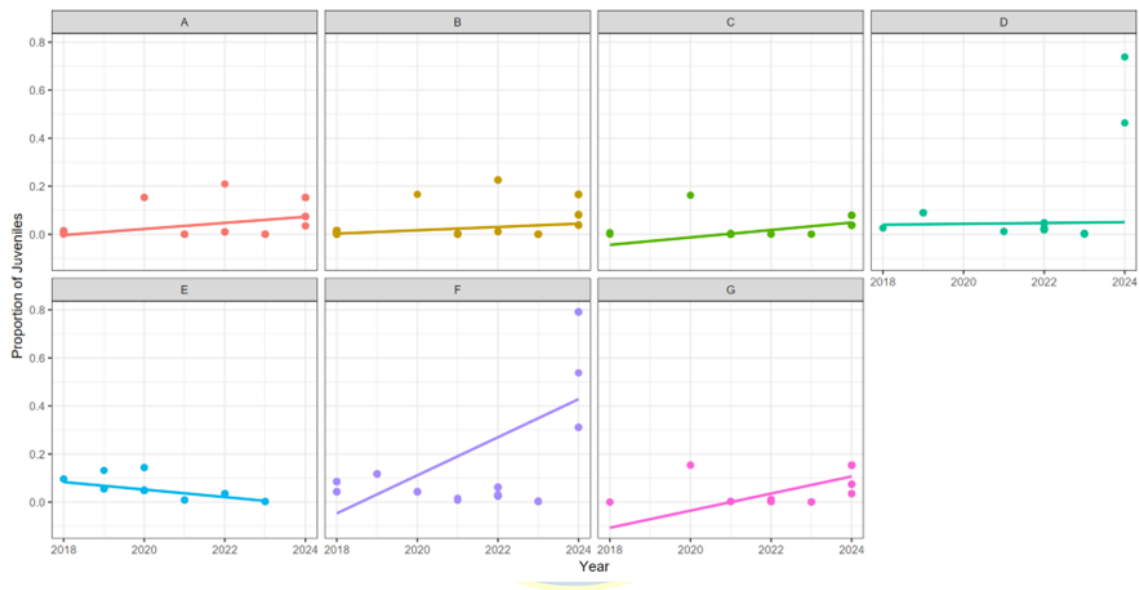


Figure 1. Proportion of juveniles per year in the different recurring fishing opportunities in the Antarctic krill fishery.

Trends in catch per unit effort (CPUE) and fishing opportunity

The CPUE trend considered the interaction between years and fishing opportunities. The model suggested a significant increase in CPUE over the study period ($\beta = 0.165$, $\rho < 0.001$), indicating a general positive trend that varied among fishing opportunities. Indeed, spatial heterogeneity of catch rates was observed, with some fishing opportunities significantly higher compared to fishing opportunity A. Specifically, B ($\beta = 0.770$, $\rho < 0.001$) and C ($\beta = 1.138$, $\rho < 0.001$) exhibited higher catch rates (Figure 6), while the rest

of the fishing opportunities were not significant with respect to A. However, negative interactions in B, C, F, and G suggest that, although the fishing opportunities showed high initial catch rates (2018), their rate of increase over time has been lower, even decreasing, as seen in C, E, F, and G (Figure 6).

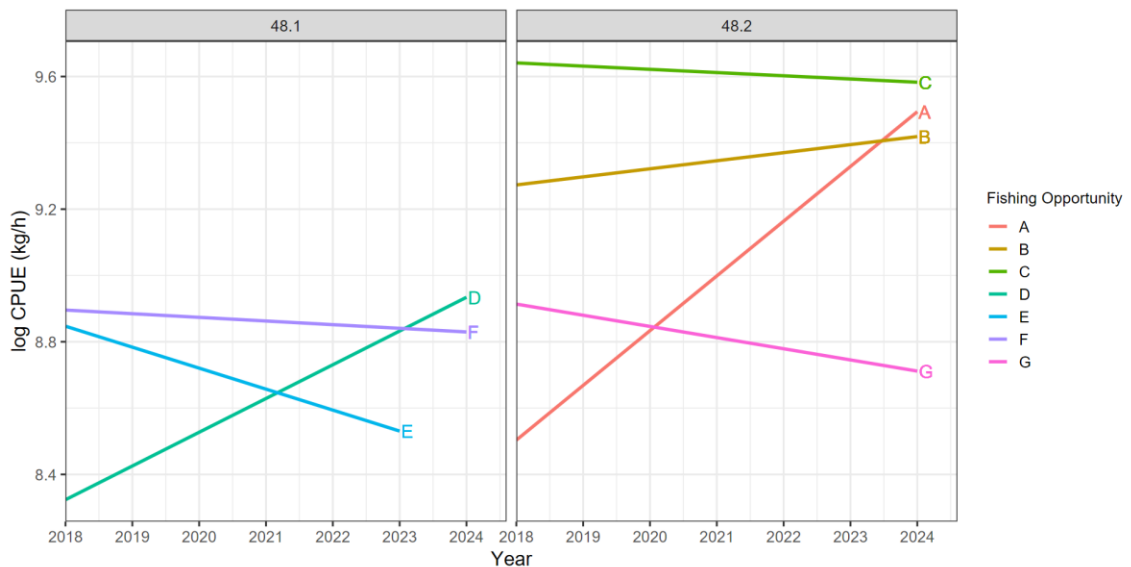


Figure 2. Catch rate performance by recurring fishing opportunity in the Antarctic krill fishery from 2018-2024.

Discussion

Seven recurring fishing opportunities were identified in the Antarctic krill fishery, distributed spatially across two main zones: three located in the Bransfield Strait (subarea 48.1) and four in the northeastern sector of the South Orkney Islands (subarea 48.2). These areas coincide with regions historically recognized for high krill abundance (Krafft et al., 2023; Atkinson et al., 2019), where the largest catches have been recorded over the past decade, particularly off the Bransfield Strait region near the Antarctic Peninsula (Subarea 48.1) and northwest of Coronation Island (Subarea 48.2) (CCAMLR, 2024).

Fishing opportunities showed differences in catch rates by year. In particular, fishing opportunities B, C, F, and G showed negative trends or low growth in CPUE over time, which may reflect a decline in local krill abundance. This pattern has been observed in other areas of the Antarctic Peninsula and has been linked to multiple factors, such as sea ice retreat, rising temperatures, increased fishing concentration, ocean fronts, and water masses regulating krill density (Kawaguchi and Nicol, 2009; Piñones and Fedorov, 2016; Santa Cruz et al., 2022; Kawaguchi et al., 2024; Zhao et al., 2025).

Despite this trend, the highest yields were concentrated in fishing opportunities located in Subarea 48.2. This could be due to both higher concentrations of biomass (Krafft et al., 2021) and differences in the structural composition of the krill swarms present in each zone. In Subarea 48.2, adult individuals predominate, and these larger specimens are more easily retained by fishing nets, thus increasing catch efficiency. In contrast, in subarea 48.1, a greater proportion of juvenile individuals has been documented. Their smaller body size increases the likelihood of escaping the nets, thereby reducing trawl efficiency and the recorded CPUE. This difference in size structure has been reported in previous studies, indicating a spatial distribution differentiated by krill developmental stage, including specimens of smaller sizes in Subarea 48.1 (Siegel, 2005; Perry et al., 2019; Atkinson et al., 2021; CCAMLR, 2024).

This result could be explained by the periods in which fishing takes place in the different subareas; fishing activity in Subarea 48.2 began in December and continued through March (CCAMLR, 2024), coinciding with the migration of gravid females to oceanic areas to spawn in the South Orkney Islands (Perry et al., 2019), which would explain their

higher proportion during these opportunities. In contrast, subarea 48.1 is concentrated in autumn and winter, with a higher frequency of smaller individuals (CCAMLR, 2024), coinciding with a greater presence of juveniles, which are mainly distributed in shelf waters, in a pattern opposite to that of adults (Perry et al., 2019). Interannual variations in the proportion of juveniles and gravid females may be modulated by ice retreat, changes in surface temperature, and other physical factors that affect the recruitment processes (Perry et al., 2019).

Along with differences in the population structure, differences in the composition of the bycatch were also detected. Fishing opportunities with higher yields, located in subarea 48.2, were associated with a greater catch and richness of accompanying fauna, with *C. gunnari* being the dominant species. In contrast, in subarea 48.1, a lower catch and richness were observed, with a greater contribution from *C. rastrispinosus*. This result coincides with CCAMLR (2024) records, which indicate a greater abundance of *C. gunnari* in subarea 48.2, and *C. rastrispinosus* in 48.1. Furthermore, these findings align with those reported by Krafft et al. (2022), who observed an increase in the catch of bycatch in subarea 48.2. However, our results differ from these studies regarding diversity, since in our analysis, the highest species richness was associated with subarea 48.2.

Fishing opportunities reflect a skipper's spatial decisions, which respond to both the availability of resources and environmental dynamics (Cubillos et al., 2022). Therefore, defining operational areas based on fishing behavior offers advantages over approaches that use arbitrary spatial units, such as fixed grids or large subareas. Previous studies have shown that defining operational units from fishing patterns allows for the characterization

of high productivity zones (Branch et al., 2005), improved estimation of relative abundance (Paradinas et al., 2017), and avoidance of errors due to spatial dilution of effort (Wiff et al., 2008).

In this regard, the differences observed between fishing opportunities in terms of yield and biological composition reinforce the need to move toward more fine-scale spatial management schemes. In particular, it is necessary to consider management units smaller than the statistical subareas defined by CCAMLR, such as Small-Scale Management Units (SSMUs) proposed by Hewitt et al. (2004) and currently promoted by Santa Cruz et al. (2022). Delimiting active fishing grounds based on their usage frequency, biological composition, and productivity would enable a more adaptive management approach, especially in the context of climate change, which alters krill distribution and Antarctic ecosystem dynamics.

Acknowledgements

GT sincerely thanks the officers, crew, and scientific observers aboard the factory vessel Antarctic Endeavor for their valuable cooperation in data collection during fishing. We also extend our thanks to the fishing company PESCA Chile S.A. for authorizing the use of their database, which was fundamental to the realization of this study. In particular, we thank Mr. Enrique Gutiérrez, General Manager of PESCA, Chile S.A., for his ongoing support and willingness to assist with this work. LC received support from COPAS COASTAL (ANID 210021), and this research contributes to Research Line 4 Conservation and Fisheries Sustainability and to the Fisheries Oceanography Research Line of the Fisheries Science Master of the University of Concepción, Chile.

References

- Alonzo, S., H., Switzer, P., V. & M. Mangel. 2003. Ecological games in space and time: The distribution and abundance of Antarctic krill and penguins. *Ecology*, 2003, 84: 1598 – 1607.
- Arana, P., M., Rolleri, R. & A. De Caso. 2020. Chilean Antarctic krill fishery (2011-2016). *Latin American Journal of Aquatic Research*, 48(2): 179-196.
- Atkinson, A., Shreeve, R. & G. Hirst. 2006. Natural growth rates in Antarctic krill (*Euphausia superba*): II. Predictive models based on food, temperature, body length, sex, and maturity stage. *Limnol. Oceanogr.*, 51(2), 2006, 973-987.
- Atkinson, A., Hill, S.L., Pakhomov, E.A., Siegel, V., Reiss, C.S., Loeb, V., Steinberg, D.K., Schmidt, K., Tarling, G.A., Gerrish, L. & Sailley, S.F. 2019. Krill (*Euphausia superba*) distribution contracts southward during rapid regional warming. *Nature Climate Change*, 9: 142-147
- Atkinson, A., Hill, S., Reiss, C., Pakhomov, E., Beaugrand, G., Tarling, G., Yang, G., Steinberg, D., Schmidt, K., Edwards, M., Rombolá, E & Perry., F. 2021. Stepping stones towards Antarctica: Switch to southern spawning grounds explains an abrupt range shift in krill. *Research Global Change Biology*, Volume 28 Issue 4 Pages 1359-1375. <https://doi.org/10.1111/gcb.16009>.
- Ball, IR., Constable, A.J., Kawaguchi, S. & Ramm, D. 2002. Defining fishing grounds in the Scotia Sea. Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCAMLR). Working Group-EMM-02/40 Rev.1 21 pp. <https://www.ccamlr.org/en/wg-emm-02/40-rev-1>. (accesible mediante requerimiento vía pagina web).
- Branch, T., Hilborn, R. & Bogazzi., E. 2005. Escaping the tyranny of the grid: a more realistic way of defining fishing opportunities. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 62: 631-642 (2005). Doi: 10.1139/F04-232.
- Browman, H. y Stergiou, K. 2004. Perspectivas sobre enfoques ecosistémicos para la gestión de los recursos marinos . *Marine Ecology Progress Series*, 274, 269–303. <https://doi.org/10.3354/meps274269>
- Campbell M.S., Stehfest K.M., Votier S.C. & Hall-Spencer JM. 2014. Mapping fisheries for marine spatial planning: Gear-specific vessel monitoring system (VMS), marine conservation and offshore renewable energy. *Marine Policy* 45: 293-300.
- Cavanagh, R., Hill, S., Knowland, C & Grant. S. 2016. Stakeholder perspectives on ecosystem-based management of the Antarctic krill fishery. *Journal Science Direct, Marine Policy*. Volumen 68: Pages 205-211. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.03.006>
- CCAMLR 2020. Krill Fishery Report. CCAMLR, Hobart, Australia.

- CCAMLR 2022. Krill Fishery Report. CCAMLR, Hobart, Australia.
- CCAMLR 2023. Krill Fishery Report. CCAMLR, Hobart, Australia.
- CCAMLR 2025. Krill Fishery Report. CCAMLR, Hobart, Australia
- Constable, A., de la Mare, K., Agnew, D., Everson, I. and D. Miller. 2000. Managing fisheries to conserve the Antarctic marine ecosystem: practical implementation of the Convention on the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCAMLR), *ICES Journal of Marine Science*, Volume 57, Issue 3, June 2000, Pages 778–791, <https://doi.org/10.1006/jmsc.2000.0725>
- Cubillos, L. A., Vilches, J., Oyarzún, C. & Yepsen, D. 2022. Fishing opportunities for the deepwater cardinalfish (*Epigonus crassicaudus*) in the continental shelf break along central Chile. *Journal of Applied Ichthyology*, 00, 1–9. <https://doi.org/10.1111/jai.14309>.
- Deehr, E., Krafft, B., Donovan, C., Wiff, R., Caneco, B & Lowther, A. 2024. Sensitivity of the stock assessment for the Antarctic krill fishery to time-varying natural and fishing mortality. *Fisheries Management and Ecology*, Volume 31, Issue 6, December 2024. <https://doi.org/10.1111/fme.12721>
- Demestre, M., Muntadas, A., de Juan, S., Mitilineou, Ch., Sartor, P., Mas, J., Kavadas, S. & Martín, J. 2015. The need for fine-scale assessment of trawl fishing effort to inform on an ecosystem approach to fisheries: Exploring three data sources in Mediterranean trawling grounds. *Marine Policy* 62: 134-143.
- Des Clers, S., Lewin, S., Edwards, D., Searle, S., Lieberknecht, L. & D. Murphy. 2008. FisherMap. Mapping the Grounds: Recording Fishermen's Use of the Seas Final Report. A report published for the Finding Sanctuary project
- Everson, I. & C., Goss. 1991. Krill fishing activity in the southwest Atlantic. *Antarctic Science* 3 (4): 351-358.
- Freer, J.J., Warwick-Evans, V., Skaret, G., Krafft, B.A., Fielding, S. and Trathan, P.N. 2025. A new dynamic distribution model for Antarctic krill reveals interactions with their environment, predators, and the commercial fishery in the south Scotia Sea region. *Limnol Oceanogr*, 70: 833-849. <https://doi.org/10.1002/lno.12809>
- Grant, S.M., Hill, S.L. and P. Fretwell. 2013 Spatial distribution of management measures, Antarctic krill catch and Southern Ocean bioregions: implications for conservation planning. *CCAMLR Science*, 20. 1-19.
- Hayward, A., Wright, S.W., Carroll, D. *et al.* Antarctic phytoplankton communities restructure under shifting sea-ice regimes. *Nat. Clim. Chang.* **15**, 889–896 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41558-025-02379-x>
- Hewitt, R., Watters, G., Trathan, P., Croxal, J.P., Goebel, M., Ramm, D., Reid, K., Trivelpiece, W & Watkins, J.L. 2004. Options for allocating the precautionary

- catch limit of krill among small-scale management units in the Scotia sea. *CCAMLS Sci.*, 11 (2004), pp. 81-97.
- Hicks, R.L., Horrace, W.C., Schnier, K.E., 2012. Strategic substitutes or complements? The game of where to fish. *J. Econometrics* 168: 70–80.
- Hill, S.L., Atkinson, A., Darby, C., Fielding, S., Krafft, B.A., Godø, O.R., Skaret, G., Trathan, P. & Watkins, J. 2016. Is current management of the Antarctic krill fishery in the Atlantic sector of the Southern Ocean precautionary? *CCAMLR Science*, 23: 31–51.
- Hill, S., L. Atkinson, A. E., A., Pakhomov & V. Siegel. 2019. Evidence for a decline in population density of Antarctic krill *Euphausia superba* Dana, 1850 still stands A comment on Cox et al. *Journal of Crustacean Biology* 39(3) 316–322.
- Husson, F., Le, S., & Pagès, J. 2017. *Exploratory Multivariate Analysis by Example Using R* (2nd ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/b21874>
- Jennings, S., and Lee, J. 2012. Defining fishing grounds with vessel monitoring system data. – *ICES Journal of Marine Science*, 69: 51–63.
- Kassambara, A. & Mundt, F. 2020. *Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R Package Version 1.0.7.* <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>
- Kawaguchi, S & S. Candy. 2009. Quantifying movement behavior of vessels in the Antarctic krill fishery. *CCAMLR Science* 16: 131-148
- Kawaguchi, S. & S., Nicol. 2007. Learning about Antarctic krill from the fishery. *Antarctic Science* 19 (2), 219–230.
- Kawaguchi, S & S. Candy. 2009. Quantifying movement behavior of vessels in the Antarctic krill fishery. *CCAMLR Science* 16: 131-148
- Kawaguchi, S. & S., Nicol. 2020. Krill fishery. In: Lovrich G, Thiel M (eds) *The natural history of Crustacea. Fisheries and aquaculture, Vol 9.* Oxford University Press, New York, NY, p 137–158
- Kawaguchi, S., Atkinson, A., Bahlburg, D. *et al.* Climate change impacts on Antarctic krill behaviour and population dynamics. *Nat Rev Earth Environ* 5, 43–58 (2024). <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00504-y>
- Krafft, B., Gavin J Macaulay, Georg Skaret, Tor Knutsen, Odd A Bergstad, Andrew Lowther, Geir Huse, Sophie Fielding, Philip Trathan, Eugene Murphy, Seok-Gwan Choi, Sangdeok Chung, Inwoo Han, Kyoungsoon Lee, Xianyong Zhao, Xinliang Wang, Yiping Ying, Xiaotao Yu, Kostiantyn Demianenko, Viktor Podhornyi, Karina Vishnyakova, Leonid Pshenichnov, Andrii Chuklin, Hanna Shyshman, Martin J Cox, Keith Reid, George M Watters, Christian S Reiss, Jefferson T Hinke, Javier Arata, Olav R Godø, Nils Hoem, Standing stock of

Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana, 1850) (Euphausiacea) in the Southwest Atlantic sector of the Southern Ocean, 2018–19, *Journal of Crustacean Biology*, Volume 41, Issue 3, September 2021, ruab046, <https://doi.org/10.1093/jcbiol/ruab046>

- Krafft, B., Lowther, A & Krag, L. 2022. By catch in the Antarctic krill (*Euphausia superba*) trawl fishery. *Fisheries Management and Ecology*. Volume 30 Issue 2. April 2023. Pages 154-160.
- Krafft, B., Zhang, G., Menze, S., Fuglseth Rasmussen, A., Dale, J., Biuw, M., Oosthuisen, C. & Lowther, A. 2023. Antarctic krill and ecosystem monitoring survey off the South Orkney Islands in 2023. ISSN:1503-6294. Research group leader(s): Kjell Gundersen (Plankton) Approved by: Research Director(s): Geir Huse Program leader(s): AnnLisbeth Agnalt
- Krafft, B., Knutsen, T., Macaulay, G. Skaret, G., Bakkeplass, K., Lowther, A., Biuw, M., Lindstrøm, U., Skern-Mauritzen, R., Klevjer, T., Berge, T., Chierici, M., Renner, A., Øyerhamn, R., Höfer, J. and G. Huse. 2023 b. Research Priorities as exercised from the Norwegian RV Kronprins Haakon during the Multinational Large-Scale Krill Survey in CCAMLR area 48, 2018/2019. *CCAMLR Science*, Vol. 24 (2023): 19-34
- Lee, S., Josse, J. & Husson, H. 2008. FactorMineR: An R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*. March 2008, Volume 25, Issue 1.
- Lindgren, F., Rue, H., & Lindstöm. 2011. An explicit link between Gaussian fields and Gaussian Markov random fields: the stochastic partial differential equation approach. *Journal of Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* / Volume 73, Issue 4 / p 423-498.
- Maina, I., Kavadas, S., Katsanevakis, S., Somarakis, S., Tserpes, G., & Georgakarakos, S. 2016. A methodological approach to identify fishing grounds: a case study on Greek waters. *Fisheries Research* 183: 326-339.
- Medley, P., G. Pilling, A. Payne, A. Hough, & S. Davies. 2009. Final Report for Antarctic Krill Pelagic Trawl Fishery. Moody Marine Ltd., Derby, UK, 297 pp.
- Murphy E.J, Watkins J.L, Trathan P.N, Reid K, Meredith M.P, Thorpe S.E, Johnston N.M, Clarke A, Tarling G.A, Collins M.A, Forcada J, Shreeve R.S, Atkinson A, Korb R, Whitehouse M.J, Ward P, Rodhouse P.G, Enderlein P, Hirst A.G, Martin A.R, Hill S.L, Staniland I.J, Pond D.W, Briggs D.R, Cunningham N.J and Fleming A.H 2007 Spatial and temporal operation of the Scotia Sea ecosystem: a review of large-scale links in a krill centred food web *Phil. Trans. R. Soc. B* 362:113–148. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1957>
- Nicol, S. & Endo, Y. 1997. Krill fisheries of the world. *FAO Fishery Technical Paper*, 367: 100 pp.

- Nicol, S & Endo, Y. 1999. Krill fisheries: Development, management and ecosystem implications. *Aquat. Living Resour.* 12 (2) (1999) 105-120
- Nicol, S. 1992. Management of the krill fishery: was CCAMLR slow to act? *Polar Rec.* 29 (1992) 155.
- Nicol, S. 2006. Krill, currents and sea ice: *Euphausia superba* and its changing environment. *BioScience*, 56, 111–120.
- Nicol, S. & J. Foster. 2003. Recent trends in the fishery for Antarctic krill. *Aquat. Living Resour.*, 16(1): 42-45.
- Nicol, S., J., Foster. & S., Kawaguchi. 2012. The fishery for Antarctic krill-recent developments. *Fish and fisheries* 30-40.
- Nicol, S., & Foster, J. 2016. The fishery for Antarctic krill – its current status and management regime. In: Siegel V (ed) *The biology and ecology of Antarctic krill, Euphausia superba* Dana, 1850. Springer, Cham, pp 387–422
- Norway 2020 Statistics. Disponible en <http://www.ssb.no/a/metadata/conceptvariable/vardok/2329/en>
- Nye, J. A., Enlace, J. S. & Liebre, J. 2009. Cambios en la distribución espacial de las poblaciones de peces en relación con el clima y el tamaño de la población en la plataforma continental del noreste de los Estados Unidos. *Serie de progreso de ecología marina. Mar Ecol Prog Ser* vol. 393:111-129.
- Paradinas, I., Conesa, D., López-Quilez., A. & Bellido JM. 2017. Spatio-Temporal model structures with shared components for semi-continuous species distribution modelling. *Spatial statistics. Volume 22, Part 2, Pages 434-450.* <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2017.08.001>
- Perry A. L, Low PJ, Ellis JR, Reynolds JD. 2005. Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science.* 2005 Jun 24;308(5730):1912-5. doi: 10.1126/science.1111322. Epub 2005 May 12. PMID: 15890845.
- Perry FA, Atkinson A, Sailley SF, Tarling GA, Hill SL, Lucas CH, Mayor DJ. 2019. Distribución del hábitat en el krill antártico: puntos calientes de desove y zonas de crianza. *PLoS One* <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219325>
- Pietzsch, B.W., Schmidt, A., Groeneveld, J. *et al.* The impact of salps (*Salpa thompsoni*) on the Antarctic krill population (*Euphausia superba*): an individual-based modelling study. *Ecol Process* 12, 50 (2023). <https://doi.org/10.1186/s13717-023-00462-9>
- Pinsky, M. L. & Fogarty, M. 2012. Respuestas socioecológicas retrasadas al cambio climático y de distribución en la pesca. *Cambio Climático* 115, 883–891 (2012). <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0599-x>

- Piñones, A & Fedorov, A. 2016. Projected changes of Antarctic krill habitat by the end of the 21st century. *Geophysical Research Letters*. Volume 43. Issue 16. Pages; 8580-8589. <https://doi.org/10.1002/2016GL069656>
- Plum C, Hillebrand H, Moorthi S (2020) Krill vs. salps: dominance shift from krill to salps is associated with higher dissolved N:P ratios. *Sci Rep* 10:5911. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62829-8>.
- R Core Team (2021) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.R-project.org>
- Russo, T., A. Parisi. & S. Cataudella. 2013. Spatial indicators of fishing pressure: preliminary analyses and possible developments. *Ecol. Indic.*, 26 (2013), pp. 141-153
- Santa Cruz, F., Ernst, B., Arata, J. & C., Parada. 2018. Spatial and temporal dynamics of the Antarctic krill fishery in fishing hotspots in the Bransfield Strait and South Shetland Islands. *Fisheries Research* 208. (2018) 157-166.
- Santa Cruz, F., Krüger, L. & C., Cárdenas. 2022. Concentraciones espaciales y temporales de captura de krill antártico: implicaciones para el rendimiento pesquero y la gestión preventiva en el Océano Austral. *Ocean and Coastal Management*
- SC-CAMLR. 2024. *Informe de la cuadragésima tercera reunión de la Comisión*. Hobart: CCAMLR
- Siegel, V. Distribution and population dynamics of *Euphausia superba*: summary of recent findings. *Polar Biol* 29, 1–22. 2005. <https://doi.org/10.1007/s00300-005-0058-5>
- Siegel, V. & Watkins, J.L. 2016. Distribution, Biomass and Demography of Antarctic krill, *Euphausia superba*. In: *Biology and ecology of Antarctic krill* (V. Siegel, ed.), pp 21–100. Springer, Basel, Switzerland
- Stowasser, G., Atkinson, A., McGill, R.A., Phillips, R.A., Collins, M.A., & Pond, D.W. 2012. Food web dynamics in the Scotia Sea in summer: A stable isotope study. *Deep Sea Res. Part 2* 59-60, 208-221.
- Tarling, G., Shreeve, R., Hirst, A., Atkinson, A., Pond, D., Murphy, E. & Watkins, J. 2006. Natural growth rates in Antarctic krill (*Euphausia superba*): I. Improving methodology and predicting intermolt period. *Limnol. Oceanogr.*, 51(2), 2006, 959-972.
- Testa, G., Neira, S., Giesecke, R. & Piñones, A. 2022. Projecting environmental and krill fishery impacts on the Antarctic Peninsula food web in 2100. *Progress in Oceanography* 206 (2022) 102862.
- Trathan, P., Friedlaender, A., Johnson, C. and Reisinger. 2025. The fishery for Antarctic krill – Conflicts between industrial production, protection of biodiversity, and

legal governance. *Marine Policy*, Volume 189, Octubre 2025. 106787.
<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2025.106787>

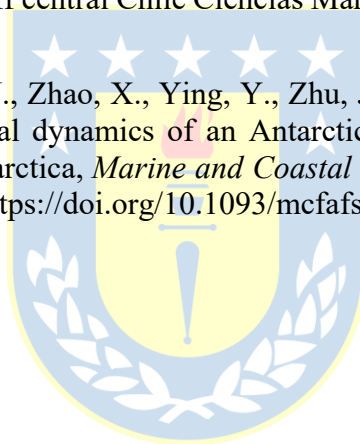
Trathan, P., N., Everson, I. & E., J., Murphy. 1998. Analysis of haul data from the South Georgia krill fishery. *CCAMLR Science*, Vol 5: 9-30.

Venables, W.N. & Ripley, B.D. 2002. *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. Springer. ISBN 978-1-4419-3008.8 DOI 10.1007/978-0-387-21706-2

Veytia, D., Bestley, S., Kawaguchi, S., Meiners, K., Murphy, E., Fraser, A., Kusahara, K., Kimura, N. and S Corney. 2021. Overwinter sea-ice characteristics important for Antarctic krill recruitment in the southwest Atlantic. *Ecological Indicators*, Volume 129, October 2021, 107934.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107934>

Wiff, R., Quiroz, J.C., Tascheri, R & Contreras, F. 2008. Effect of fishing tactics on the standardization of cardinalfish (*Epigonus crassicaudus*) catch rates in the demersal multispecies fishery off central Chile *Ciencias Marinas*, vol. 34, núm. 2, 2008, pp. 143-154.

Zhao, Y., Wang, X., Zhang, J., Zhao, X., Ying, Y., Zhu, J., Fan, G., Xu, Q., Liu, L. and X, Mu. 2025. Seasonal dynamics of an Antarctic krill resource hot spot in the Bransfield Strait, Antarctica, *Marine and Coastal Fisheries*, Volume 17, Issue 3, May 2025, vtaf012, <https://doi.org/10.1093/mcfafs/vtaf012>.



CAPÍTULO II

Análisis espacial y temporal de la tasa de captura de krill antártico (*Euphausia superba*) en oportunidades de pesca recurrentes en las subáreas 48.1 y 48.2

Gabriela Torretti¹ & Luis Cubillos^{1,2}

¹Programa de Magister en Ciencias con mención en Pesquerías, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción, Concepción, Chile. Email: gtorretti@udec.cl

²COPAS Coastal, Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Concepción, Chile



Resumen

En este estudio se evaluó la variabilidad espacio-temporal de la tasa de captura (CPUE) en oportunidades de pesca recurrentes, utilizando datos de un solo buque comercial que opero entre 2017 al 2024 en las subáreas estadísticas 48.1 y 48.2. Las oportunidades de pesca fueron identificadas mediante un análisis de agrupamiento espacial de lances individuales, y se modeló la CPUE mediante modelos bayesianos jerárquicos espacio

temporales ajustados con INLA (Integrated Nested Laplace Approximation). Se incorporaron efectos fijos de variables ambientales y operacionales, así como efectos aleatorios estacionales, anuales y un campo espacial dinámico con estructura AR(1) en el tiempo. Los resultados mostraron que la distancia de arrastre tuvo un efecto negativo y significativo en ambas subáreas, aunque con mayor pendiente en Islas Orcadas del Sur (48.2). Las variables ambientales y operacionales explicaron parte de las variaciones, pero la inclusión del efecto espacial fue crucial para capturar la heterogeneidad en las subáreas, mostrando que los patrones de captura están fuertemente estructurados en el espacio. En el Estrecho de Bransfield (48.1), el rango espacial fue de 49.6 km y la desviación estándar fue de 0.28, mientras que en Islas Orcadas del Sur (48.2), estos valores fueron más altos (56.5 km y 0.36, respectivamente), lo que sugiere una mayor heterogeneidad espacial y una mayor movilidad del esfuerzo de pesca. En ambas subáreas, el parámetro GroupRho no mostró evidencia clara de dependencia espacio-temporal, aunque fue levemente mayor en la subárea 48.2.

Palabras claves: Krill antártico, CPUE, espacio-temporal, Estrecho de Bransfield, Islas Orcadas del Sur.

Introducción

A nivel global, los efectos del cambio climático están modificando los patrones de agregación y distribución de numerosas especies marinas, lo que ha generado cambios en la dinámica de los caladeros y en la disponibilidad de recursos pesqueros (Perry *et al.*, 2005; Nye *et al.*, 2009; Pinsky & Fogarty, 2012). En este contexto, la aparición de nuevas

áreas de pesca y la modificación de caladeros tradicionalmente explotados representan desafíos tanto para la evaluación de stocks como para la gestión sustentable de las pesquerías.

En el océano Austral, la pesquería de krill antártico (*Euphausia superba*) ha experimentado una evolución espacial considerable desde sus inicios. Originalmente concentrada en la subárea 58 (océano Índico), la actividad se ha desplazado progresivamente hacia la subárea 48, en el sector del Atlántico sur, particularmente en la región occidental de la Península Antártica, incluyendo los estrechos de Bransfield y Gerlache (Maschette *et al.*, 2025; Trathan *et al.*, 2018; Krüger, 2019). Además, se ha evidenciado un cambio temporal importante, mientras que históricamente la pesca se realizaba principalmente en verano, actualmente la mayor parte del krill se captura durante el otoño (CCAMLR, 2024), cuando las agregaciones tienden a concentrarse sobre la plataforma continental (Trathan *et al.*, 2022; Warwick-Evans *et al.*, 2022a).

Estos cambios han sido facilitados por el aumento en la duración de los períodos de formación del hielo marino, lo que ha permitido el acceso a nuevas zonas y una extensión de la temporada de pesca casi todo el año (Santa Cruz *et al.*, 2022). Como resultado, la flota ha comenzado a explotar áreas previamente inaccesibles, generando lo que se conoce como “oportunidades de pesca”, definidas como zonas seleccionadas por los capitanes para operar en función del conocimiento previo, la experiencia y la agregación del recurso (Branch *et al.*, 2005; Cubillos *et al.*, 2022).

Las oportunidades de pesca pueden clasificarse como esporádicas o recurrentes. Estas últimas se caracterizan por ser explotadas repetidamente en distintos años, tienden a agruparse espacialmente y presentan tasas de captura significativamente más altas que las esporádicas, reflejando una mayor eficiencia en áreas históricamente identificadas como rentables (Branch *et al.*, 2005; Cubillos *et al.*, 2022). Sin embargo, este patrón altamente agregativo ha generado preocupación sobre el posible agotamiento local del recurso, ya que los barcos operan en grupo y ejercen una presión sostenida sobre las mismas agregaciones durante varios días consecutivos (Kawaguchi & Nicol, 2007; Santa Cruz *et al.*, 2018, 2022; Krüger, 2019).

Frente a este escenario, los datos operacionales generados por la propia flota, como bitácoras de pesca y registros de observadores científicos, ofrecen una fuente valiosa de información para evaluar la distribución y abundancia del krill (Trathan *et al.*, 1998). La captura por unidad de esfuerzo (CPUE) ha sido utilizada como índice de abundancia relativa en múltiples estudios (Hill *et al.*, 2016), aunque su validez como proxy de abundancia absoluta ha sido cuestionada debido a la variabilidad en prácticas de pesca y eficiencia entre buques (Kawaguchi & Candy, 2009; Santa Cruz *et al.*, 2018). Aun así, se reconoce su utilidad como indicador de presencia y persistencia de agregaciones localizadas de krill (Atkinson *et al.*, 2012).

En los últimos años, los modelos jerárquicos espacio temporales bajo un enfoque bayesiano se han consolidado como una herramienta poderosa para el análisis de datos pesqueros y ecológicos, especialmente cuando se busca caracterizar patrones de

distribución en especies móviles y altamente agregativas como el krill (Thorson *et al.*, 2015; Lindgren *et al.*, 2011). Estos modelos permiten estimar de manera más precisa la variabilidad de la CPUE al considerar la estructura de dependencia espacial y temporal presente en los datos, incluso en situaciones donde los muestreos no son sistemáticos o presentan heterogeneidad (Rue *et al.*, 2009; Blangiardo & Cameletti, 2015). Particularmente, el uso del enfoque INLA (Integrated Nested Laplace Approximation) ofrece ventajas computacionales significativas respecto a los métodos tradicionales de inferencia bayesiana como MCMC, lo cual resulta fundamental al trabajar con grandes volúmenes de datos espacio temporales y múltiples efectos aleatorios. Además, la formulación SPDE (Stochastic Partial Differential Equations) que integra INLA permite representar campos espaciales continuos mediante mallas triangulares, facilitando una modelación más realista de la distribución del recurso en el espacio geográfico (Lindgren *et al.*, 2011).

En este contexto, aplicar modelos bayesianos espacio temporales con INLA al análisis de la CPUE permite identificar no solo las áreas de alta eficiencia pesquera, sino también evaluar cómo estas zonas cambian en el tiempo bajo la influencia de condiciones ambientales y operacionales. Esta aproximación resulta particularmente adecuada para especies como el krill, cuya productividad y disponibilidad puede estar modulada por procesos oceanográficos altamente dinámicos (Kinzey *et al.*, 2019), y cuya gestión requiere una comprensión fina de las interacciones entre el esfuerzo pesquero y la estructura del hábitat.

El presente estudio se enfoca exclusivamente en las oportunidades de pesca recurrentes de un solo buque que operó en la subárea 48.1 y 48.2 entre 2017 hasta el 2024. Estas fueron definidas a partir de un análisis espacial de agrupamiento de lances individuales. A partir de esta información, se analiza cómo las variables ambientales (temperatura, velocidad del viento) y operacionales (profundidad de pesca, distancia y velocidad de arrastre, rumbo) influyen sobre la variabilidad espacio temporal de la CPUE. Al integrar un efecto espacial dinámico en el tiempo, este enfoque busca generar evidencia útil para mejorar la comprensión ecológica del recurso y aportar elementos que apoyen una gestión más precisa de la pesquería de krill antártico.

Materiales y Métodos

Datos analizados

Se analizaron las bitácoras del buque factoría chileno Antarctic Endeavour, durante faenas de pesca comercial de krill antártico (*Euphausia superba*) realizadas en las subáreas estadísticas 48.1 (Elephant Island, South Sheatland Islands, Bransfield Strait), 48.2 (South Orkney Islands) (Fig.1) que cubren desde los años 2017-2024. Estos datos tienen una resolución lance a lance y conteniendo información operacional del barco incluyendo fecha, captura (toneladas), esfuerzo (horas de arrastre) y ubicación geográfica (latitud longitud), entre otros detalles. Los lances de pesca se realizaron utilizando una red comercial Omega 200, que tiene una abertura de boca 18 m de alto y 22 m de ancho, equipada con un copo de 30 m de largo y una malla de 16 mm.

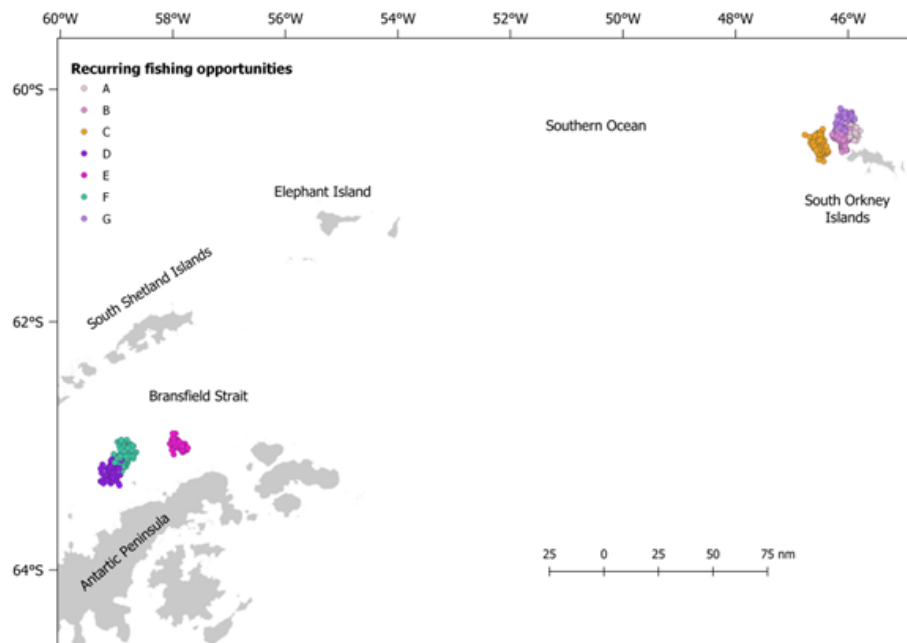


Figura 1. Lances pertenecientes a las oportunidades de pesca recurrentes en la pesquería de krill antártico en las subáreas estadísticas 48.1 (Estrecho de Bransfield) y 48.2 (Isla Orcadas del Sur). Los colores representan las oportunidades de pesca recurrentes a las que pertenece cada lance, las oportunidades de pesca D, E y F, corresponden a la subárea 48.1, mientras que, A, B, C y G, corresponden a la 48.2.

Agrupamiento

Para determinar las oportunidades de pesca se utilizó el método propuesto por Branch et al (2005). El método consiste en realizar un análisis de agrupamiento de lances de pesca individuales. Para ello es importante tanto las posiciones iniciales como finales de la red de arrastre a la hora de definir las posibilidades de pesca. Se utilizó la distancia euclidiana para medir la proximidad geográfica de los lances individuales. La distancia euclidiana se definió como una combinación de la distancia entre las dos posiciones utilizando así las latitudes y longitudes iniciales, las latitudes y longitudes finales (todas ellas en grados decimales) de cada lance. Antes de calcular la distancia euclidiana, las longitudes se multiplicaron por el coseno de la latitud para asegurarse de que las

latitudes y las longitudes estuvieran ambas en las mismas unidades de distancia. Esto se debe a que las líneas de longitud están más juntas que las líneas de latitud:

$$lon^{inicial} = lon^{inicial} \cos\left(\frac{lat^{inicial}}{360} 2\pi\right), lon^{final} = lon^{final} \cos\left(\frac{lat^{final}}{360} 2\pi\right)$$

Oportunidades de Pesca

Los lances se agruparon según la técnica agrupación jerárquico aglomerado basados en la distancia Euclidiana. Para discriminar las oportunidades de pesca en el árbol conglomerado, se comenzó con nivel de corte $h = 0.25$ sugerido por Branch *et al.*, (2005) y se fijó iterativamente el nivel de corte en $h = 0.2$. Este valor equilibra el n° de grupos que contenía un único lance frente a más lances. Se revisó si el conjunto de pesca único aislado para verificar si estos conjuntos contenían errores de posición inicial y final. Se consideraron oportunidad de pesca recurrente las que tenían más de 50 lances de pesca y cubrían la mayoría de los años de la serie temporal, (Cubillos *et al.*, 2022).

Variables ambientales y tendencia de la captura por unidad de esfuerzo

Para analizar los factores que determinan la variabilidad en la captura por unidad de esfuerzo (ton/hr) en las oportunidades de pesca recurrentes en la pesquería de krill antártico, se implementó un modelo bayesiano jerárquico mediante el paquete INLA (Integrated Nested Laplace Approximation) (<https://www.r-inla.org/>) con el enfoque de ecuaciones diferenciales parciales estocásticas (SPDE) (Lindgren *et al.*, 2011) para R (R Core Team 2021). Se consideraron dos modelos principales uno de carácter espacial, que

evalúa la variabilidad geográfica, y otro espaciotemporal que incorpora la dimensión temporal de manera autorregresiva en los efectos espaciales.

Modelo espacial

El primer modelo considera la CPUE como variables respuesta con distribución Gamma, en función de una serie de covariables ambientales y operacionales (temperatura, profundidad de arrastre, fuerza del viento, nudos, distancia de arrastre, duración del arrastre, rumbo, variable categórica de las 7 oportunidades de pesca recurrentes), así como efecto aleatorio espacial. Este último mediante un enfoque de Ecuaciones Diferenciales Parciales Estocásticas (SPDE) sobre una malla definida a partir de las posiciones geográficas de las oportunidades de pesca recurrentes.

El modelo espacial es representado como:

$$CPUE_i \sim \text{Gamma}(\mu_i, \theta), \quad \log(\mu_i) = \beta_0 + \sum_k \beta_k X_{ik} + f_{spatial}(s_i)$$

Donde X_{ik} representa las covariables incluidas como efectos fijos $f_{spatial}(s_i)$ es el efecto espacial aleatorio capturado por el modelo SPDE.

Modelo espaciotemporal

El segundo modelo incorpora una estructura temporal en la dependencia espacial. Específicamente, se modeló la evaluación del efecto espacial mediante un proceso autorregresivo de primer orden entre períodos (años), lo cual permite representar la

dinámica y como se modifican las estructuras espaciales de la CPUE a lo largo del tiempo en las oportunidades de pesca.

El modelo esta expresado como:

$$CPUE_{i,t} \sim \text{Gamma}(\mu_{i,t}, \theta), \quad \log(\mu_{i,t}) = \beta_0 + \sum_k \beta_k X_{i,k,t} + f_{\text{spatial-time}}(s_i, t)$$

Donde el termino $f_{\text{spatial-time}}(s_i, t)$ representa una superficie espaciotemporal modelada como campo Gaussiano con estructura de correlación temporal entre años, y espacialmente mediante SPDE.

Ambos modelos fueron ajustados utilizando el enfoque INLA, el cual permite una inferencia eficiente y precisa sobre modelos bayesianos jerárquicos de tipo gaussiano.

Para seleccionar el mejor modelo y comparar su capacidad predictiva, se utilizaron el criterio de información de Watanabe-Akaike (WAIC) y el criterio de información de devianza (DIC) (Spiegelhalter *et al.*, 2014; Watanabe, 2010). Según Rue *et al.* (2009), INLA evalúa la desviación en la media posterior para los campos latentes y en la moda posterior para los hiperparámetros, no en la media posterior de todos los parámetros.

Resultados

Se evaluó la variación espacio temporal de la tasa de captura por unidad de esfuerzo (CPUE) del krill antártico (*Euphausia superba*) en las oportunidades de pesca recurrentes en las subáreas 48.1 y 48.2, mediante la implementación de modelos jerárquicos bayesianos ajustados con INLA (Integrated Nested Laplace Approximation). Cada subárea fue modelada por separado, y los modelos incluyeron combinaciones de efectos fijos y aleatorios para covariables ambientales, operacionales y espaciales. A partir de los

criterios de información DIC (Deviance Information Criterion) y WAIC (Watanabe-Akaike Information Criterion) (Tabla 1), se seleccionó un modelo con mejor ajuste por subárea.

Tabla 1. Resumen de los principales parámetros del mejor modelo m2 en las subáreas estadísticas 48.1 y 48.2. Se presenta el valor del intercepto (media), el rango espacial (en kilómetros) y la desviación estándar, correlación temporal del campo espacial, así como las métricas de ajuste del modelo: la log-verosimilitud marginal (log-likelihood), Criterio de Información de Deviance (DIC) y Criterio de Información de Watanabe-Akaike (WAIC).

Subárea	Intercepto	Rango Espacial (km)	Desv. Sd	Group Rho	log-likelihood	DIC	WAIC
48.1	6.98	49.6	0.28	-0.005	-2,453.36	4805.014582	4805.014582
48.2	8.14	56.5	0.36	-0.201	-6769.08	13340.61357	13340.61357

El modelo con mejor ajuste para las dos subáreas estadísticas fue m2, el cual incorporó efectos fijos para las oportunidades de pesca recurrentes y un campo espacial dinámico con estructura AR(1). No obstante, su desempeño, los parámetros estimados y las propiedades del campo espacial difirieron entre subáreas, reflejando posibles contrastes en la organización espacial y dinámica del esfuerzo pesquero.

En ambas subáreas, se evidencia una relación negativa significativa entre la distancia de arrastre y la tasa de captura (Fig. 2). En el Estrecho de Bransfield (48.1) (Fig. 2A), se observó un descenso progresivo en la tasa de captura estimada a medida que aumentó la distancia de arrastre, con valores que disminuyeron desde aproximadamente 520 hasta cerca de 100 unidades (Fig. 2). Este patrón fue consistente con el coeficiente negativo estimado para la distancia en el modelo (-0.092 ; IC95%: -0.109 a -0.075), lo que sugiere una reducción en la eficiencia del esfuerzo con el incremento del desplazamiento horizontal del arte de pesca. En Islas Orcadas del Sur (48.2) (Fig. 2B), esta relación fue aún más marcada, con una caída más pronunciada de la tasa de captura estimada (Fig. 2)

y un coeficiente de mayor magnitud (-0.123 ; IC95%: -0.137 a -0.110), indicando una mayor sensibilidad observada frente al aumento en la distancia de arrastre.

Los efectos fijos asociados a las oportunidades de pesca recurrentes mostraron patrones diferenciados por subárea. En la subárea 48.1 (Fig. 2C) las oportunidades de pesca D, E y F estuvieron asociadas a efectos positivos sobre la tasa de captura con valores promedios entre 2.2 y 2.45. Los efectos estimados para las oportunidades de pesca A, B, C y G en la subárea 48.2 (Fig. 2D) fueron más homogéneos y de menor magnitud destacando la oportunidad de pesca G como aquella con menor tasa de captura estimada (Fig. 2D). Aunque los intervalos de credibilidad incluyeron el cero (lo que indica que estos efectos no fueron estadísticamente significativos), las estimaciones puntuales sugieren que ciertas zonas operativas podrían estar asociadas a rendimientos relativamente mayores (Fig. 2).

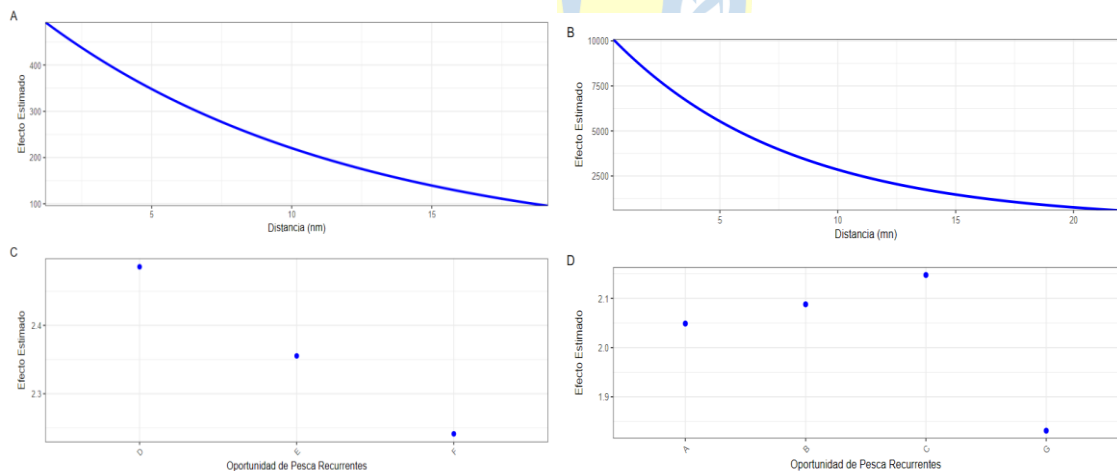
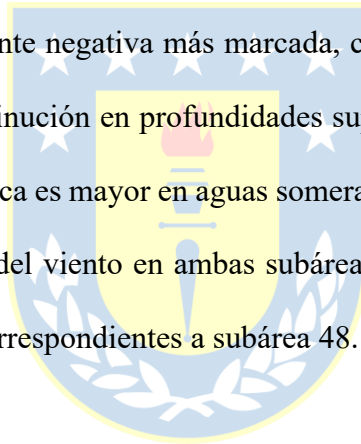


Figura 2. Efectos de las variables fijas Distancia y Oportunidad de pesca recurrentes sobre la tasa de captura en la pesquería de krill antártico donde los gráficos (A) y (C) corresponden a la subárea 48.1, mientras que (B) y (D) pertenecen a la subárea 48.2. Los gráficos (A) y (B) son la distancia recorrida en millas náuticas (MN) durante el arrastre. Los gráficos (C) y (D) corresponden a las oportunidades de pesca recurrentes en las subáreas 48.1 y 48.2, respectivamente.

La temperatura para ambas subáreas muestra una relación poco pronunciada (Fig. 3) y no significativa sobre la en la tasa de captura. En la subárea 48.2 se observó una leve tendencia positiva hacia temperaturas superiores a 0 °C (Fig. 3B), aunque sin evidencia estadística clara.

La profundidad presentó una relación negativa con la tasa de captura en ambas subáreas, más pronunciado en la 48.2 (Fig. 3D). En el Estrecho de Bransfield (Fig. 3C), el efecto se mantuvo relativamente estable en profundidades menores a 100 m, pero mostró una disminución progresiva en rangos más profundos. Mientras que, en Islas Orcadas del Sur el efecto presentó una pendiente negativa más marcada, con un valor máximo alrededor de los 75 m y una clara disminución en profundidades superiores (Fig. 3D). Este patrón indica que la eficiencia de pesca es mayor en aguas someras. El efecto estimado de la tasa de captura con la intensidad del viento en ambas subáreas, fueron cercanos a cero y no significativos (Fig. 3E y F, correspondientes a subárea 48.1 y 48.2, respetivamente).



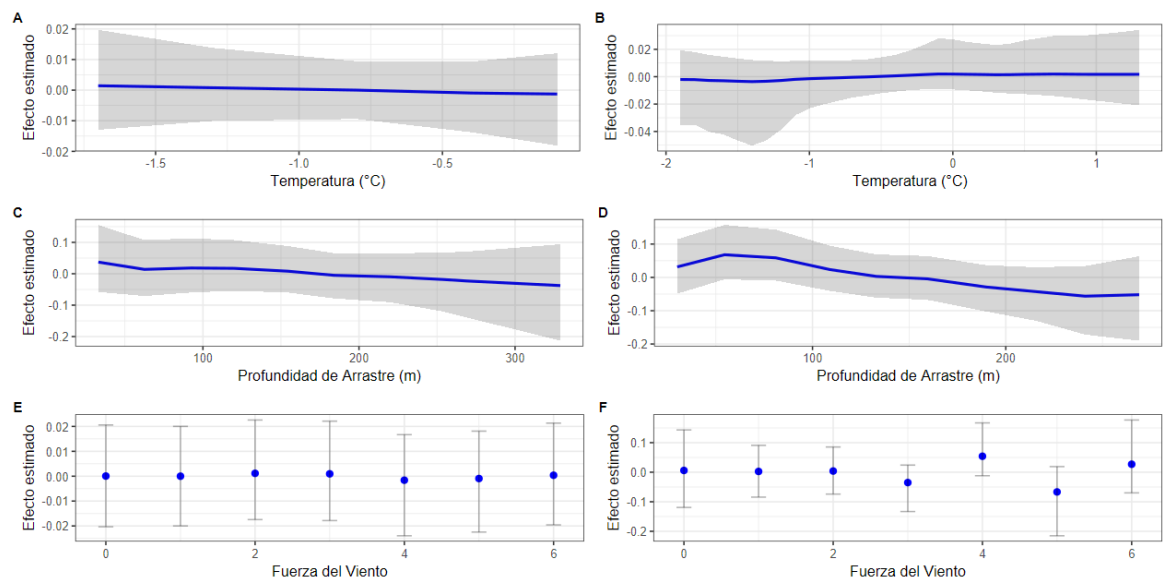


Figura 3. Efectos aleatorios de las variables ambientales Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Profundidad de Arrastre (m) y Fuerza del Viento sobre la CPUE en las operaciones de pesca de krill antártico. El panel izquierdo corresponde a la subárea 48.1 y el derecho a la subárea 48.2. Las curvas azules representan los valores medios posteriores, y las bandas grises indican los intervalos de credibilidad del 95 %. Mientras que los paneles E y F, los puntos azules muestran los valores medios posteriores y las barras indican los intervalos de credibilidad del 95 %.

En ambas subáreas (Fig. 4A y B), el efecto aleatorio asociado a la velocidad de arrastre (nudos) mostró una relación débil y no significativa con la tasa de captura. Las curvas estimadas se mantuvieron próximas a cero, y los intervalos de credibilidad fueron amplios, sin evidencias de un patrón sistemático. En la subárea 48.2 (Fig. 4D), sin embargo, se observó una pendiente positiva más clara, con un aumento del efecto estimado entre los 0° y $\sim 180^{\circ}$, seguido de una estabilización. Sin embargo, el rumbo para ambas subáreas no fue significativo.

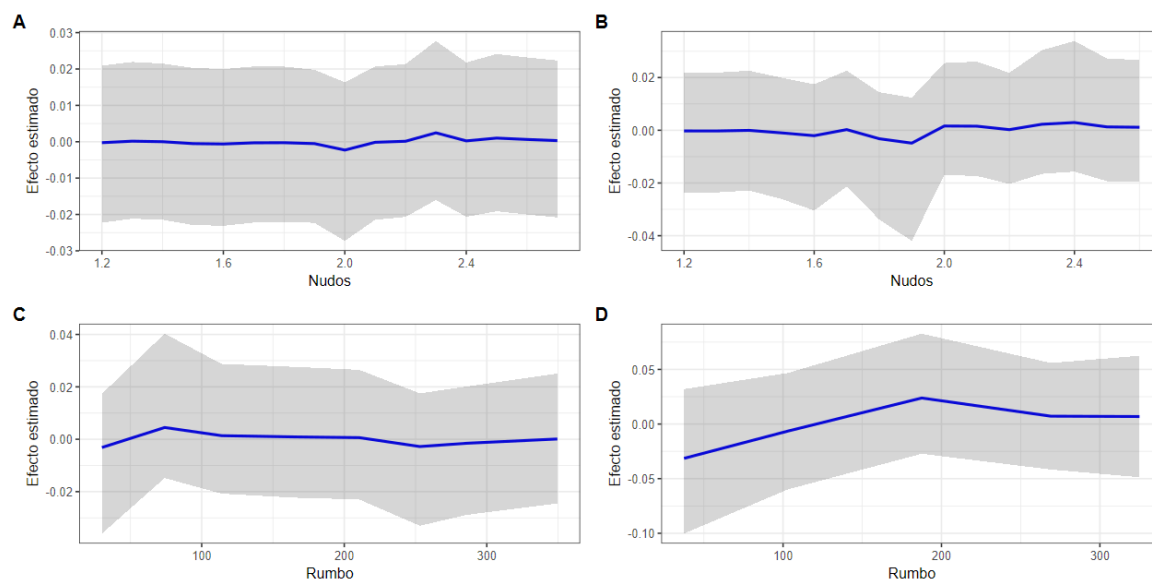


Figura 4. Efectos aleatorios operacionales de la velocidad en la que arrastra (nudos) y rumbo (dirección en la cual realiza el arrastre) sobre la CPUE en las operaciones de pesca de krill antártico. El panel izquierdo corresponde a la subárea 48.1 y el derecho a la subárea 48.2. Las curvas azules representan los valores medios posteriores, y las bandas grises indican los intervalos de credibilidad del 95 %.

Los efectos aleatorios estimados para cada año mostraron variación entre períodos en la subárea 48.1, con valores positivos en 2018 y 2022, y negativos en 2019, 2020 y 2024 (Fig. 5A). No obstante, la variación de la tasa de captura entre años no fue significativa. En contraste, en Islas Orcadas del Sur (48.2), el efecto de año fue prácticamente nulo, con valores estimados cercanos a cero (Fig. 5B)

La influencia del mes sobre la tasa de captura en la subárea 48.1, mostró una variación leve, con efectos estimados entre -0.1 y 0.1 (Fig. 5C). La amplitud de los intervalos de credibilidad sugiere alta incertidumbre, lo que impide detectar un patrón estacional claro. En cambio, en la subárea 48.2, se observó un patrón estacional claro y significativo, los efectos fueron negativos durante el primer semestre (mínimo en junio), aumentaron

significativamente en julio y agosto, y disminuyeron nuevamente hacia diciembre, donde se registró el valor más bajo (-2) (Fig. 5D). Este resultado revela una marcada variabilidad intraanual en la eficiencia del esfuerzo pesquero, posiblemente asociada a la dinámica estacional del krill o a la disponibilidad operativa durante distintos períodos del año.

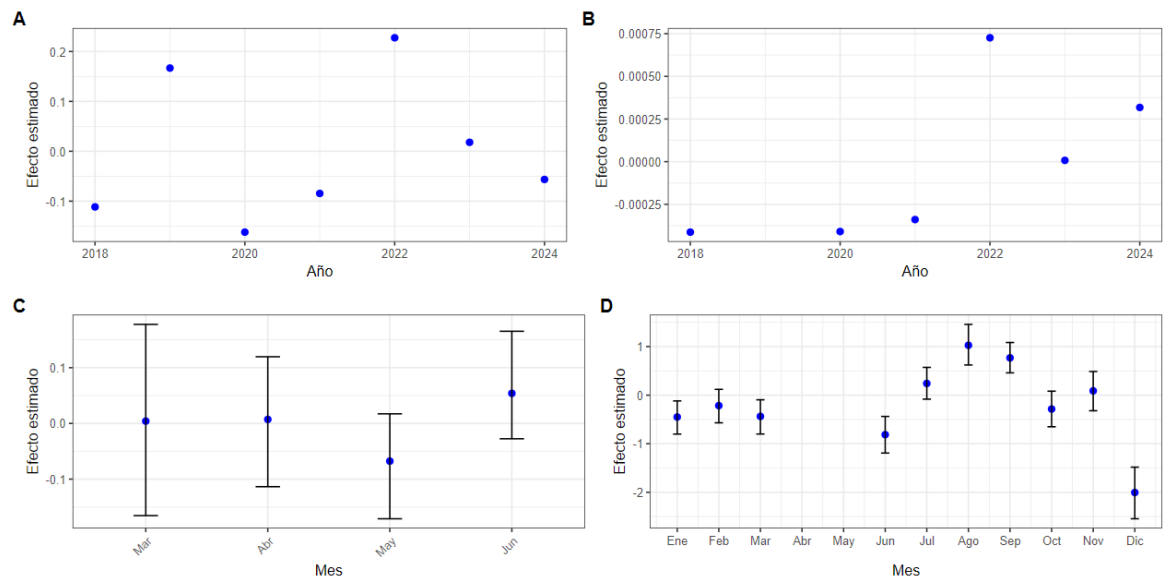


Figura 5. Efectos aleatorios los años (2018 al 2024) y meses (ene a dic) sobre la CPUE en las operaciones de pesca de krill antártico. El panel izquierdo corresponde a la subárea 48.1 y el derecho a la subárea 48.2. Los puntos azules muestran los valores medios posteriores y las barras indican los intervalos de credibilidad del 95 %.

En el Estrecho de Bransfield el patrón espacial estimado para el efecto anual muestra una estructura espacial relativamente persistente a lo largo del período analizado (2018-2024). Durante 2019 y 2020 se observan zonas con valores positivos (hasta 0.5, en escala logarítmica) coincidentes con la presencia de las oportunidades de pesca E y D (Fig. 6). La desviación estándar del campo espacial se mantuvo estable entre años, con valores entre 0.25 y 0.35, y zonas de menor incertidumbre concentradas donde se registró mayor esfuerzo pesquero (Fig. 7). El rango espacial estimado fue de 49.6 km (IC95%: 20.8–

98.6), lo que indica un grado de autocorrelación espacial moderado. La desviación estándar del campo espacial fue de 0.279, y el parámetro GroupRho para la interacción espacio-tiempo fue -0.005 (Tabla 1), con un intervalo de credibilidad amplio (IC95%: -0.57 a 0.58), lo que sugiere que no hubo una autocorrelación espacio temporal significativa. En consecuencia, si bien se identificaron patrones espaciales estables, estos no mostraron una tendencia claramente dependiente del año, reforzando la idea de que la distribución espacial del rendimiento es robusta pero estacionaria.

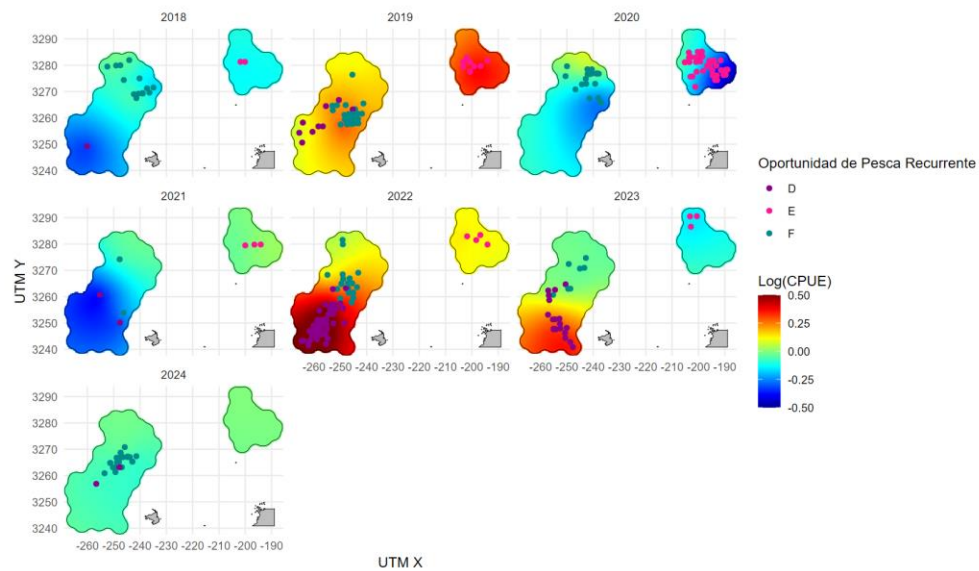


Figura 6. Campo espacial del efecto aleatorio anuales sobre la tasa de captura ($\log C_{pue}$) en la subárea estadística 48.1, durante las operaciones de pesca de krill antártico para el periodo 2018-2024. Los colores indican el valor del efecto posterior medio y los puntos representan los lances agrupados en oportunidades de pesca recurrentes (D, E y F).

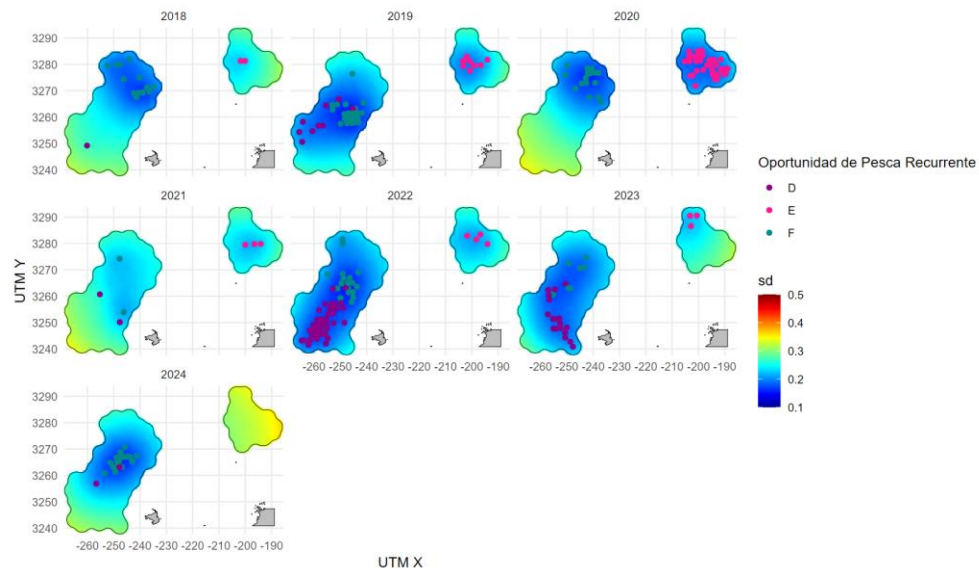
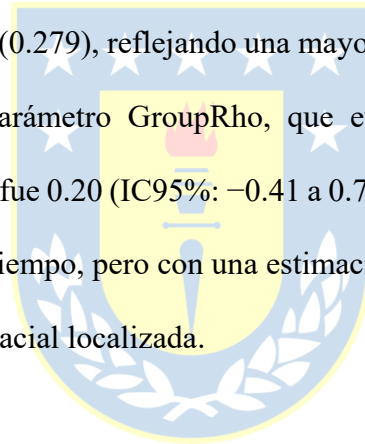


Figura 7. Desviación estándar posterior del campo espacial anual en la subárea estadística 48.1, correspondiente a la incertidumbre del efecto aleatorio estimado sobre la CPUE. Los puntos representan los lances agrupados en oportunidades de pesca recurrentes (D, E y F).

En contraste, la subárea 48.2 revelan una marcada variabilidad interanual en los patrones espaciales de la tasa de captura, presentó patrones espaciales más definidos y persistentes a lo largo del tiempo. Durante los años 2022 y 2024 se observó una expansión significativa de las áreas con altos efectos estimados sobre la CPUE con valores positivos que abarcaron extensas zonas (Fig. 8). En particular, el año 2022 presentó la mayor área continua de alto rendimiento estimado, lo cual sugiere condiciones operacionales o ambientales favorables que podrían haber facilitado una mayor eficiencia pesquera. Esta tendencia es consistente con los efectos fijos estimados para las oportunidades A, B y C, que mostraron valores relativamente elevados de CPUE, en contraste con la oportunidad G, que presentó el menor efecto estimado (Fig. 2D), en torno a 1.83 (IC95%: -25.9 a 29.6), lo cual se refleja en su ubicación recurrente en áreas de menor tasa de captura (Fig. 8).

La desviación estándar, muestran que las áreas intensamente explotadas (por ej., 2022 y 2024) se asociaron a menores niveles de incertidumbre, especialmente en torno a las oportunidades C y A (Fig. 9), lo cual refuerza la robustez del efecto espacial estimado en estas zonas. En cambio, áreas periféricas o no exploradas presentaron una mayor incertidumbre (desv. estándar > 0.35), particularmente en años como 2021 (Fig. 9).

Desde el punto de vista cuantitativo, el modelo m2 estimó un rango espacial de 56.5 km (IC95%: 32.3–91.7), lo que indica una autocorrelación espacial moderada en los efectos sobre la CPUE. La desviación estándar del campo fue de 0.363, valor superior al observado en la subárea 48.1 (0.279), reflejando una mayor heterogeneidad espacial en la subárea 48.2. Además, el parámetro GroupRho, que evalúa la dependencia espacio temporal del efecto aleatorio, fue 0.20 (IC95%: -0.41 a 0.70), sin evidencia de interacción significativa entre espacio y tiempo, pero con una estimación puntual positiva que podría sugerir cierta persistencia espacial localizada.



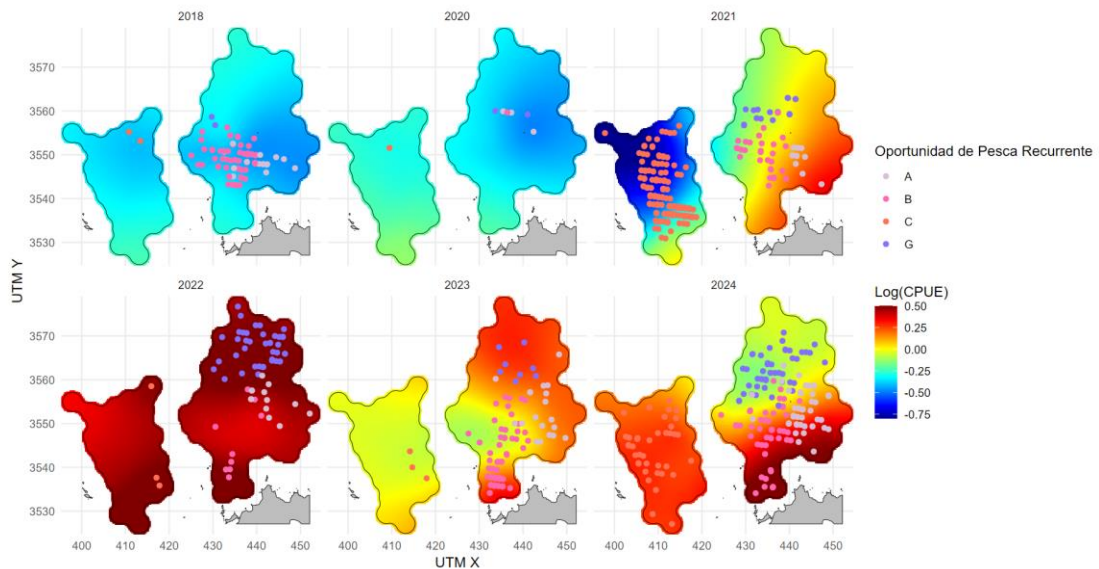


Figura 8. Campo espacial del efecto aleatorio anual sobre la tasa de captura ($\log C_{pue}$) en la subárea estadística 48.2, durante las operaciones de pesca de krill antártico para el periodo 2018-2024. Los colores indican el valor del efecto posterior medio y los puntos representan los lances agrupados en oportunidades de pesca recurrentes (A, B, C y G).

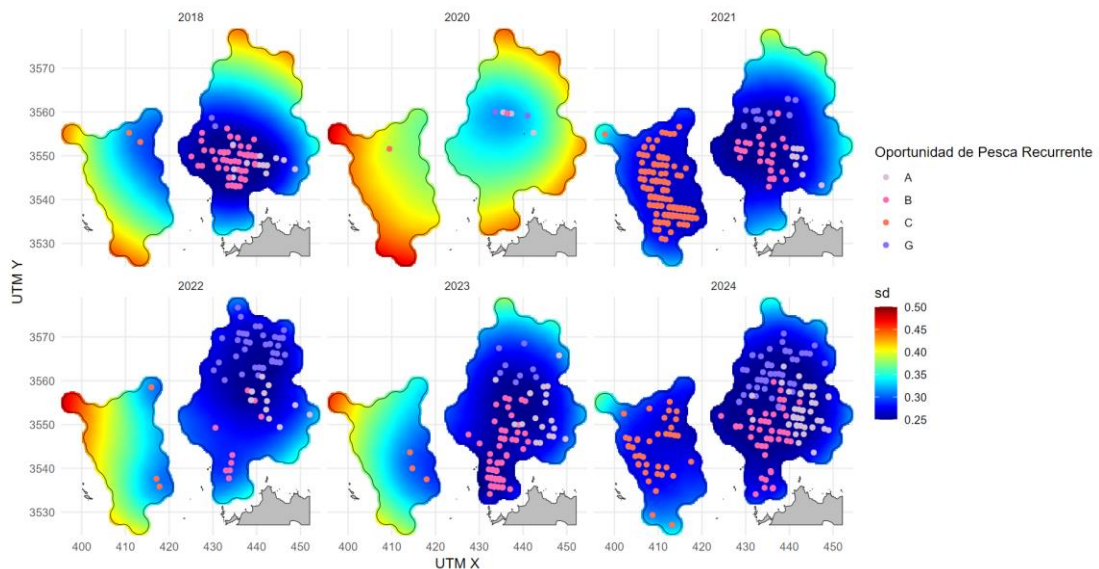


Figura 9. Desviación estándar posterior del campo espacial anual en la subárea estadística 48.2, correspondiente a la incertidumbre del efecto aleatorio estimado sobre la CPUE. Los puntos representan los lances agrupados en oportunidades de pesca recurrentes (A, B, C y G).

Discusión

Nuestros resultados evidenciaron que el rango espacial fue ligeramente mayor en la subárea estadística 48.2 en comparación con la subárea 48.1 (Tabla 1), lo que sugiere que la correlación espacial entre puntos de pesca se extiende a distancias más amplias. Este patrón indicaría una mayor dispersión espacial en las agregaciones de krill, en Islas Orcadas del Sur. No obstante, el efecto de interacción espacio tiempo fue cercano a cero en la subárea 48.1, mientras que en la 48.2 fue ligeramente positivo, indicando una mayor persistencia temporal en la estructura espacial. Es decir, las zonas de alta o baja CPUE tienden a mantenerse estables entre años, lo que refleja una distribución persistente del recurso o prácticas operativas consistentes por parte del buque. Estos resultados coinciden con estudios previos que identifican agregaciones de krill estables en la plataforma al noroeste de las islas Orcadas (Perry *et al.*, 2019; Warwick-Evans *et al.*, 2018; Skaret *et al.*, 2023).

En contraste, la variabilidad espacio temporal observada en la subárea 48.1 podría asociarse a una mayor sensibilidad del krill a condiciones ambientales en el Estrecho de Bransfield, o con una mayor flexibilidad en la estrategia operativa del buque pesquero. Sin embargo, diversos estudios han reportado una concentración intensa y persistente de la actividad pesquera en esta zona (Krüger *et al.*, 2019; Santa Cruz *et al.*, 2022). Esta subárea mostró valores superiores de CPUE en comparación con la subárea 48.2, con una intensidad operativa marcada en un breve periodo de cuatro meses, lo que sugiere una presión pesquera focalizada que puede generar impactos localizados en el ecosistema,

especialmente en zonas de alta importancia ecológica para el ciclo de vida del krill y para sus depredadores (Santa Cruz *et al.*, 2022; Meyer *et al.*, 2020).

Desde el punto de vista operativo, la distancia de arrastre mostró una relación negativa con la tasa de captura en ambas subáreas, indicando una reducción del rendimiento en lances más extensos. Este patrón puede deberse a una menor eficiencia del arte de pesca en zonas de menor densidad o a una dispersión del recurso. Estudios previos sostienen que, cuando la disponibilidad local de krill es baja, los arrastres se alargan, cuando las capturas disminuyen considerablemente los barcos se desplazan en busca de agregaciones más densas (Kawaguchi *et al.*, 2005), lo que implicaría una estrategia adaptativa del esfuerzo.

En el caso de la profundidad de arrastre en particular en la subárea 48.2 se detectó una relación negativa significativa entre la profundidad de arrastre y la tasa de captura, lo que sugiere que los mayores rendimientos se concentran en zonas menos profundas, posiblemente por una mayor agregación de los enjambres de krill cerca de la superficie, los enjambres que se encuentran en la superficie y están más agrupados, mientras cuando se profundizan se dispersan (Valdez *et al.*, 2022), lo cual podría explicar las menores tasas de captura a mayores profundidades.

La temperatura no mostró significancia estadística sobre la CPUE en ninguna subárea. Sin embargo, el krill es una especie estenotérmica que evita los cambios bruscos de temperatura acercándose a los frentes polares Antárticos (Krafft *et al.*, 2010; Valdez *et al.*, 2022) el aumento de la temperatura de agua de mar inducido por el cambio climático ha

generado cambios en la distribución del krill (Atkinson et al., 2019) además de que la temperatura juega un papel fundamental en la abundancia, crecimiento y reproducción del krill (Pietzch *et al.*, 2023). Los efectos de la velocidad de arrastre sobre la CPUE no fueron significativos sobre la CPUE en ninguna subárea, lo que sugiere una estabilidad operativa en este parámetro, esto se puede deber principalmente a que a una velocidad muy baja la red de pesca no alcanza su eficiencia técnica y de igual forma a mucha velocidad el flujo de agua que entra a la red es superior a la que es capaz de liberar por los tamaños de malla (Stanislaw & Martini 1987).

Si bien la fuerza del viento y el rumbo no fueron significativos en ninguna de las subáreas, el rumbo mostro una posible relación positiva con la CPUE en la subárea 48.2, con efecto creciente hasta los 180°, este patrón no se evidencio en la subárea 48.1. Sin embargo, aunque nuestros resultados no son concluyentes, hay diversos mecanismos físicos que pueden alterar la abundancia del krill como son los fuertes vientos, mareas y corrientes (Warren *et al.*, 2009; Bernard *et al.*, 2017), como es el estudio realizado por Bernard *et al.*, (2017) en donde las agregaciones grandes y densas de krill son más frecuentes durante mareas diurnas y vientos del oeste.

Aunque los efectos fijos y aleatorios de las oportunidades de pesca recurrentes no fueron estadísticamente significativos en los modelos, sus estimaciones puntuales positivas sugieren que colectivamente podrían estar capturando patrones estructurales relevantes. Esta falta de significancia podría explicarse por la selección de lances con alta captura o por la reducida comparabilidad entre subáreas.

Desde una perspectiva de manejo, nuestros resultados adquieren relevancia en el contexto del retiro de la Medida de Conservación 51-07 de la CCAMLR a partir de la temporada 2024/25. Esta medida limitaba la captura máxima por subárea estadística, con el objetivo de evitar la concentración espacial excesiva. Su eliminación podría conducir a una intensificación de la pesca en las zonas históricamente más productivas, como el Estrecho de Bransfield, incrementando el riesgo de competencia trófica con predadores dependientes del krill (Meyer *et al.*, 2020).

La CCAMLR ha señalado la necesidad de implementar medidas de manejo a pequeña escala espacial, como las Unidades de Manejo a Escala Pequeña (SSMUs), para garantizar la protección adecuada de las especies dependientes del krill (Hill *et al.*, 2016). Las áreas de pesca asociadas a las oportunidades de pesca pueden ser útiles para evaluar los cambios en la abundancia relativa con modelos jerárquicos espaciotemporales bayesianos (Paradinas *et al.*, 2017), evitando los efectos de seleccionar grandes áreas arbitrarias (Wiff *et al.*, 2008). Nuestros resultados demuestran diferencias marcadas en los patrones espaciales y temporales de la CPUE y en la distribución de las oportunidades de pesca recurrentes entre subáreas, refuerzan la necesidad de retomar estrategias de manejo espacialmente diferenciadas, basadas en evidencia empírica.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa pesquera PESCA Chile S.A. por permitir el acceso a su base de datos, lo que hizo posible la realización de este estudio. En particular, expresamos nuestro reconocimiento al Sr. Enrique Gutiérrez, Gerente General, por su

apoyo y disposición constante. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento a la tripulación, oficiales del buque factoría Antarctic Endeavour por su valiosa colaboración en la recopilación de los datos a bordo.

Referencias

- Atkinson, A., Hill, S.L., Pakhomov, E.A., Siegel, V., Reiss, C.S., Loeb, V., Steinberg, D.K., Schmidt, K., Tarling, G.A., Gerrish, L. & Salliey, S.F. 2019. Krill (*Euphausia superba*) distribution contracts southward during rapid regional warming. *Nature Climate Change*, 9: 142-147
- Atkinson, A., Nicol, S., Kawaguchi, S., Pakhomov, E., Quetin, L., Ross, R., Hill, S., Reiss, C & Siegel, V. 2012. Fitting *Euphausia superba* into Southern Ocean food-web models: A review of data sources and their limitatios. *CCAMLR Science*, Vol 19 (2012): 219-245.
- Bernard, K., Cimino, M., Fraser, W., Kohut, J., Oliver, M., Patterson-Fraser, D., Schofield, O., Statscewich, H., Steinberg, D. & Winsor, P. 2017. Factors that affect the nearshore aggregations of Antarctic krill in a biological hotspot. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, ISSN: 0967-0637, Vol: 126, Page: 139-147. DOI: 10.1016/j.dsr.2017.05.008
- Blangiardo, M., & Cameletti, M. (2015). *Spatial and Spatio-temporal Bayesian Models with R-INLA*. Wiley.
- Branch, T., Hilborn, R. & Bogazzi, E. 2005. Escaping the tyranny of the grid: a more realistic way of defining fishing opportunities. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 62: 631-642 (2005). Doi: 10.1139/F04-232.
- Cubillos, L. A., Vilches, J., Oyarzún, C. & Yepsen, D. 2022. Fishing opportunities for the deepwater cardinalfish (*Epigonus crassicaudus*) in the continental shelf break along central Chile. *Journal of Applied Ichthyology*, 00, 1–9. <https://doi.org/10.1111/jai.14309>.
- CCAMLR Secratariat. 2024. Fishery Report 2023: *Euphausia superba* in Area 48.1.
- Hill, S.L., Atkinson, A., Darby, C., Fielding, S., Krafft, B.A., Godø, O.R., Skaret, G., Trathan, P. & Watkins, J. 2016. Is current management of the Antarctic krill fishery in the Atlantic sector of the Southern Ocean precautionary? *CCAMLR Science*, 23: 31–51.
- Kawaguchi, S., Nicol, S., Taki, K & Naganobu, M. 2005. A conceptual model of Japanese krill fishery. *SC-CCAMLR-WG-EMM05.30*.

- Kawaguchi, S. & S., Nicol. 2007. Learning about Antarctic krill from the fishery. *Antarctic Science* 19 (2), 219–230.
- Kawaguchi, S & S. Candy. 2009. Quantifying movement behavior of vessels in the Antarctic krill fishery. *CCAMLR Science* 16: 131-148
- Kinzey, D., Watters, G. M., & Reiss, C. S. 2019. A spatially explicit operating model for the Antarctic krill fishery. *Ecological Modelling*, 400, 34–50. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.03.006>
- Krafft, B.A., Macaulay, G.J., Skaret, G., Knutsen, T., Bergstad, O.A., Lowther, A. et al. (2021) Standing stock of Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana, 1850) (Euphausiacea) in the Southwest Atlantic sector of the Southern Ocean, 2018–19. *Journal of Crustacean Biology*, **41**(3), ruab046. Available from: <https://doi.org/10.1093/jcbiol/ruab046>
- Krafft B, Melle W, Knutsent T, Bagoien E, Broms C, Ellertsen B, Siegel V. 2010. Distribution and demography of Antarctic krill in the Southeast Atlantic sector of the Southern Ocean during the austral summer 2008. *Polar Biol.* 33 (7): 957968. doi:10.1007/s00300-010-0774-3.
- Krüger L. 2019. Spatio-temporal trends of the krill fisheries in the Western Antarctic peninsula and southern Scotia arc. *Fish. Manage. Ecol.* 26, 327–333. doi: 10.1111/fme.12363
- Lindgren, F., Rue, H., & Lindström, J. 2011. An explicit link between Gaussian fields and Gaussian Markov random fields: The stochastic partial differential equation approach. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 73(4), 423–498. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2011.00777.x>
- Maschette, D., Wotherspoon, S., Murase, H., Kelly, N., Ziegler, P., Swadling K & Kawaguchi S. 2025. Resource potential and maturity estimates of *Euphausia superba* in East Antarctica. *Frontiers in Marine Science: Volume 12 – 2025*. DOI: 10.3389/fmars.2025.1448250. ISSN=2296-7745
- Meyer, B., Atkinson, A., Bernard, K. S., Brierley, A. S., Driscoll, R & Hill, S. L., et al. 2020. Successful ecosystem-based management of Antarctic krill should address uncertainties in krill recruitment, behaviour and ecological adaptation. *Commun. Earth Environ.* 1, 28. doi: 10.1038/s43247-020-00026-1
- Nye, J. A., Enlace, J. S. & Liebre, J. 2009. Cambios en la distribución espacial de las poblaciones de peces en relación con el clima y el tamaño de la población en la plataforma continental del noreste de los Estados Unidos. *Serie de progreso de ecología marina. Mar Ecol Prog Ser* vol. 393:111-129.

- Perry A. L, Low PJ, Ellis JR, Reynolds JD. 2005. Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science*. 2005 Jun 24;308(5730):1912-5. doi: 10.1126/science.1111322. Epub 2005 May 12. PMID: 15890845.
- Perry FA, Atkinson A, Sailley SF, Tarling GA, Hill SL, Lucas CH, Mayor DJ. 2019. Distribución del hábitat en el krill antártico: puntos calientes de desove y zonas de crianza. *PLoS One* <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219325>
- Pietzsch, B.W., Schmidt, A., Groeneveld, J. *et al.* The impact of salps (*Salpa thompsoni*) on the Antarctic krill population (*Euphausia superba*): an individual-based modelling study. *Ecol Process* **12**, 50. 2023. <https://doi.org/10.1186/s13717-023-00462-9>
- Pinsky, M. L. & Fogarty, M. 2012. Respuestas socioecológicas retrasadas al cambio climático y de distribución en la pesca. *Cambio Climático* 115, 883–891 (2012). <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0599-x>
- R Core Team 2021 R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.R-project.org>
- Rue, H., Martino, S., & Chopin, N. 2009. Approximate Bayesian inference for latent Gaussian models using integrated nested Laplace approximations (INLA). *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 71(2), 319–392. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2008.00700.x>
- 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. *Fish. Res.* 208, 157–166. doi: 10.1016/j.fishres.2018.07.020
- Santa Cruz F., Krüger L., Cárdenas C. A. 2022. Spatial and temporal catch concentrations for Antarctic krill: Implications for fishing performance and precautionary management in the southern ocean. *Ocean Coast. Manage.* 223, 106146. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2022.106146
- Skaret, G., Macaulay, G. J., Pedersen, R., Wang, X., Klevjer, T. A., Krag, L.A & Krafft, B.A. 2023. Distribution and biomass estimation of Antarctic krill (*Euphausia superba*) off the South Orkney Islands during 2011–2020, *ICES Journal of Marine Science*, Volume 80, Issue 5, July 2023, Pages 1472–1486, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad076>
- Spiegelhalter, D., Best, N., Carlin, B., & Van Der Line, A. 2014. The deviance information criterion: 12 year on. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*/ Volumen 76, Issue 3/ p. 485-493.
- Stanislaw, L. & Martini, L. 1987. Artes y Métodos de Pesca. Materiales Didácticos para la Capacitación Técnica. Editorial hemisferio sur S.A. I.S.B.N. 950-504-364-3. Pag: 117-121.

- Thorson, J. T., Johnson, K. F., Methot Jr, R. D., & Taylor, I. G. 2015. Model-based estimates of effective sample size in stock assessment models using the Dirichlet-multinomial distribution. *Fishery Bulletin*, 113(2), 177–187. <https://doi.org/10.7755/FB.113.2.4>
- Trathan, P., N., Everson, I. & E., J., Murphy. 1998. Analysis of haul data from the South Georgia krill fishery. *CCAMLR Science*, Vol 5: 9-30.
- Trathan P. N., Warwick-Evans V., Hinke J., Young E. F., Murphy E. J., Carneiro A., et al. 2018. Managing fishery development in sensitive ecosystems: identifying penguin habitat use to direct management in Antarctica. *Ecosphere* 9. doi: 10.1002/ecs2.2392
- Trathan P., Warwick-Evans V., Young E. F., Friedlaender A. S., Kim J.-H., Kokubun N. 2022. The ecosystem approach to management of the Antarctic krill fishery - the 'devils are in the detail' at small spatial and temporal scales. *J. Mar. Syst.* 225, 103598doi: 10.1016/j.jmarsys.2021.103598
- Valdez, C., Grados, D., La Cruz, L., Cuadros, G., Cornejo, M & Castillo R. 2022. Caracterización acústica de las agregaciones de krill (*Euphausia superba*) detectadas automáticamente en el Estrecho de Bransfield e Isla Elefante
- Watanabe, S. 2010. Asymptotic equivalence of Bayes cross validation and widely applicable information criterion in singular learning theory. *Journal of Machine Learning Research*, 11, 3571-3594.
- Warren, J., Santora, J. & Demer, D. 2009. Submesoscale distribution of Antarctic krill and its avian and pinniped predators before and after a near gale. *Journal Marine Biology*, Volume 156, pages 479-49. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00227-008-1102-0>.
- Warwick-Evans, V., Ratcliffe, N., Lowther, A., Manco, F., Ireland, Clewlow, H & Trathan, P. 2018. Using habitat models for chinstrap penguins *Pygoscelis antarctica* to advise krill fisheries management during the penguin breeding season. *Journal of Conservation Biogeography Diversity and Distributions*; Volume 24, Issue 12 Pages: 1756-1771 <https://doi.org/10.1111/ddi.12817>
- Warwick-Evans V., Fielding S., Reiss C., Watters G., Trathan P. (2022a). Estimating the average distribution of Antarctic krill at the northern Antarctic peninsula during austral summer and winter. *Polar Biol.* 45, 857–871. doi: 10.1007/s00300-022-03039-y
- Warwick-Evans V, Constable A, Dalla Rosa L, Secchi ER, Seyboth E and Trathan PN (2022) Using a risk assessment framework to spatially and temporally spread the fishery catch limit for Antarctic krill in the west Antarctic Peninsula: A template for krill fisheries elsewhere. *Front. Mar. Sci.* 9:1015851. doi: 10.3389/fmars.2022.1015851

Wiff, R., Quiroz, J.C., Tascheri, R & Contreras, F. 2008. Effect of fishing tactics on the standardization of cardinalfish (*Epigonus crassicaudus*) catch rates in the demersal multispecies fishery off central Chile *Ciencias Marinas*, vol. 34, núm. 2, 2008, pp. 143-154.



VERIFICACIÓN DE LA HIPOTESIS PLANTEADA

El presente manuscrito fue desarrollado considerando la siguiente hipótesis de trabajo:

H1: Las operaciones de pesca sobre krill antártico se estructuran espacialmente en oportunidades de pesca, y aquellas recurrentes temporalmente determinan tasas de captura más altas, y una composición de fauna acompañante y condiciones ambientales diferentes de aquellas oportunidades de pesca esporádicas.

Las operaciones de pesca del buque factoría Antarctic Endeavour se organizaron espacialmente en 27 oportunidades de pesca, de las cuales siete fueron recurrentes. Estas se localizaron en dos zonas de alta relevancia histórica para la pesquería de krill: tres en el Estrecho de Bransfield (Subárea 48.1) y cuatro en el sector noreste de las Islas Orcadas del Sur (Subárea 48.2). La distribución de estas oportunidades coincide con áreas previamente reconocidas por presentar elevadas concentraciones de krill y altas tasas de captura, lo que confirma que el barco dirige su esfuerzo hacia zonas de mayor productividad.

Las oportunidades recurrentes presentaron tasas de captura superiores y una composición diferenciada respecto de las esporádicas. En la Subárea 48.2 predominó una estructura poblacional compuesta por hembras grávidas, capturadas principalmente en verano (diciembre-marzo) en zonas oceánicas de las Islas Orcadas del Sur, junto con una mayor diversidad de fauna acompañante, dominada por *Chamsocephalus gunnari*. En contraste, en la Subárea 48.1, donde las capturas se

concentran en otoño e invierno en zonas costeras, mayor proporción de juveniles en la captura, con menor diversidad de fauna acompañante, destacando *Chionodraco rastrispinosus*.

En términos espaciales, las oportunidades de la subárea 48.2 presentaron una correlación espacial mayor y una persistencia temporal más marcada, con zonas de alta y baja abundancia relativa del krill que se mantuvieron más estables entre años, lo que sugiere estrategias operativas más consistentes. Por el contrario, en 48.1 la distribución fue más variable, posiblemente por mayores dificultades para capturar krill de menor tamaño o una mayor flexibilidad operativa del buque. No obstante, en esta subárea se alcanzaron abundancias relativas más elevadas en periodos cortos de intensa actividad, lo que podría generar impactos localizados en el ecosistema.

Respecto de las variables ambientales y operativas, se detectó una relación negativa entre distancia de arrastre y la abundancia relativa del krill en ambas subáreas, así como una relación negativa de la profundidad de arrastre, más marcada en la subárea 48.2. Estos resultados indican que las mayores abundancias se concentran en aguas someras, donde los cardúmenes de krill tienden a agregarse. Aunque la temperatura no mostró efectos estadísticamente significativos, se reconoce su papel fundamental en la distribución, crecimiento y reproducción del krill.

En conjunto, los resultados confirman que las oportunidades de pesca recurrentes presentan tasas de capturas más altas y una composición biológica diferenciada. La distancia y profundidad de arrastre fueron las variables más determinantes, ambas con un efecto negativo sobre la abundancia relativa del krill. Sin embargo, la temperatura,

el rumbo, la velocidad de arrastre y la fuerza del viento no mostraron efectos concluyentes. Esta ausencia de significancia no implica que dichas variables carezcan de relevancia ecológica, sino que su influencia no fue detectada en la escala y condiciones de operación analizadas, posiblemente debido a que el modelo se ajustó de manera independiente por subárea, lo que limita la comparación directa de condiciones ambientales, ya que el buque opera mayoritariamente en el verano en la subárea 48.2 y en otoño en la subárea 48.1.

Por lo tanto, la hipótesis se valida de manera parcial: se acepta en sus componentes espaciales, de tasa de captura y de composición biológica (fauna acompañante), mientras que en su dimensión ambiental se acepta solo parcialmente. Esto resalta la necesidad de futuros estudios comparativos entre subáreas para evaluar la influencia de las condiciones oceanográficas sobre la dinámica de explotación del krill.

