





ORIGINAL RESEARCH



Caracterización acústica de las agregaciones de krill (*Euphausia superba*) detectadas automáticamente en el Estrecho de Bransfield e Isla Elefante

CARLOS VALDEZ*, DANIEL GRADOS, LUIS LA CRUZ, GUSTAVO CUADROS, RODOLFO CORNEJO y RAMIRO CASTILLO

Instituto del Mar del Perú (IMARPE), Esquina Gamarra y Gral. Valle s/n, PO Box 22, Chucuito, Perú.

ORCID *Carlos Valdez*  <https://orcid.org/0000-0003-3022-0656>, *Daniel Grados*  <https://orcid.org/0000-0001-5184-2740>,

Luis La Cruz  <https://orcid.org/0000-0002-2208-4538>, *Gustavo Cuadros*  <https://orcid.org/0000-0003-2397-111X>,

Rodolfo Cornejo  <https://orcid.org/0000-0001-9325-6512>, *Ramiro Castillo*  <https://orcid.org/0000-0003-0580-2742>



RESUMEN. En el presente estudio se caracterizaron agregaciones de krill (*Euphausia superba*) identificadas en el Estrecho de Bransfield y alrededores de la Isla Elefante. Los datos fueron recolectados con una ecosonda multifrecuencia SIMRAD EK80 durante tres veranos australes: 2018, 2019 y 2020. Para la detección de agregaciones de krill se utilizaron dos frecuencias (38 y 120 kHz) y un algoritmo incluido en un programa destinado para el post procesamiento denominado Echoview versión 9, automatizado con el paquete EchoviewR en R. Se detectaron un total de 22.221 agregaciones. Los descriptores acústicos fueron analizados con la correlación de Pearson. Para la caracterización de agregaciones de krill se aplicó un análisis de componentes principales (PCA), seguidamente de un agrupamiento jerárquico. Para determinar las diferencias temporales de los clústeres fue aplicado un análisis de varianza (ANOVA). Además, a las agregaciones de krill se le asignaron las variables ambientales superficiales para aplicarle un modelo generalizado aditivo (GAM). Utilizando las primeras tres dimensiones del PCA (que explicaron 81% de la variabilidad total) se identificaron tres clústeres. El primer clúster se caracterizó por tener agregaciones de krill con menor altura (2 m), bajos valores en el coeficiente de retrodispersión acústica ($7 \text{ m}^2 \text{ mn}^{-2}$), y estar ubicado a mayor profundidad (81 m). El segundo clúster tuvo las agregaciones más someras (34 m), de menor longitud (75 m) y compacidad (202). Finalmente, el tercer clúster presentó agregaciones de mayor longitud (849 m), volumen (207.412 m^3) y altura (11 m), además de tener elevados valores de retrodispersión acústica ($637 \text{ m}^2 \text{ mn}^{-2}$), oblicuidad (6), compacidad (2.436) y coeficiente de variación (213). Espacialmente, el clúster I se localizó con mayor presencia en los alrededores de la Isla Elefante durante el 2018 y 2019, mientras que para este mismo período los clústeres I y II se ubicaron dispersos en toda la zona de estudio, pero focalizados en el Estrecho de Bransfield. Para 2020 se presentaron anomalías térmicas de $+ 2 \text{ }^\circ\text{C}$ aproximadamente y hubo una dispersión de los tres clústeres en toda la zona de estudio, donde se observó que el clúster I se localizó con mayor presencia en el Estrecho de Bransfield. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los clústeres por año. Sin embargo, dichas diferencias no fueron tan marcadas. Mediante un GAM, se estableció que todas las variables para cada clúster fueron significativas ($p < 0,05$). Las agregaciones se mantuvieron en condiciones promedio de temperatura ($0,8 \text{ }^\circ\text{C}$), salinidad (34,14) y oxígeno disuelto ($8,16 \text{ ml l}^{-1}$). A escala interanual, se observó que las características de las agregaciones no cambiaron.



*Correspondence:
cvaldez@imarpe.gob.pe

Received: 13 February 2022

Accepted: 21 March 2022

ISSN 2683-7595 (print)

ISSN 2683-7951 (online)

<https://ojs.inidep.edu.ar>

Journal of the Instituto Nacional de
Investigación y Desarrollo Pesquero
(INIDEP)



This work is licensed under a Creative
Commons Attribution-
NonCommercial-ShareAlike 4.0
International License

Palabras clave: Hidroacústica, agregaciones, Antártida, ecosonda multifrecuencia SIMRAD EK80, bioestadística.

Acoustic characterization of automatically detected krill (*Euphausia superba*) aggregations in the Bransfield Strait and Elephant Island

ABSTRACT. This study shows the characterization of krill (*Euphausia superba*) aggregations identified in the Bransfield Strait and around of Elephant Island. Data were collected using a mul-

tifrequency SIMRAD EK80 echosounder during three austral summers: 2018, 2019 and 2020. For detection of krill aggregations, two frequencies (38 and 120 kHz) and an automated Echoview version 9 algorithm with the EchoviewR package in R were used. A total of 22,221 aggregations were detected. Acoustic descriptors were analyzed with Pearson's correlation. For the characterization of krill aggregations, principal component analysis (PCA) was applied, followed by hierarchical clustering. To determine temporal differences of clusters, an ANOVA was applied. In addition, krill aggregations were assigned to surface environmental variables to apply a generalized additive model (GAM). Three clusters were identified using the first three dimensions of the PCA (which explained 81% of the total variability). The first cluster was characterized by krill aggregations having lower height (2 m), backscattering acoustic energy ($7 \text{ m}^2 \text{ mn}^{-2}$), and being located at a greater depth (81 m). The second cluster had the shallowest swarms (34 m), shortest length (75 m) and compactness (202). Finally, the third cluster had the largest swarms in length (849 m), volume ($207,412 \text{ m}^3$) and height (11 m); in addition of having greater acoustic energy ($637 \text{ m}^2 \text{ mn}^{-2}$), obliquity (6), compactness (2,436) and coefficient of variation (213). Spatially, cluster I was located with a greater presence around Elephant Island during 2018 and 2019, while for the same period, clusters I and II were located scattered throughout the study area but focused on the Bransfield Strait. By 2020, thermal anomalies of approximately $+ 2 \text{ }^\circ\text{C}$ were presented and a dispersion of the three clusters was noted throughout the study area, where cluster I was located with a greater presence in the Bransfield Strait. Significant differences ($p < 0.05$) were found among the clusters per year. However, such differences were not so marked. Through a GAM, it was determined that all variables for each cluster were significant ($p < 0.05$). Swarms were kept in average conditions of temperature ($0.8 \text{ }^\circ\text{C}$), salinity (34.14) and dissolved oxygen (8.16 ml l^{-1}). On an interannual scale, it was observed that the characteristics of aggregations remained unchanged.

Key words: Hydroacoustic, aggregations, Antarctica, multifrequency echosounder SIMRAD EK80, biostatistics.

INTRODUCCIÓN

El krill (*Euphausia superba*) es la especie multicelular con mayor biomasa del mundo (Bar-On et al. 2018) encontrándose los mayores stocks en el océano austral (Gascón y Werner 2005) donde se han reportado grandes densidades que han llegado hasta los 2 millones de toneladas en 100 km^2 (Murphy et al. 1988; Nowacek et al. 2011). Además, es una especie clave en el funcionamiento del ecosistema austral (Mac Cauley 1987; Greene et al. 1991; Agnew 1992; Arntz 1997; Alonso et al. 2003; Hewitt et al. 2004; Siegel et al. 2004), siendo el principal alimento de ballenas, focas, pingüinos, aves, entre otros depredadores (Smetacek y Nicol 2005; Trathan y Hill 2016). Debido a su alta abundancia y disponibilidad, desde los años 70 el océano austral se convirtió en una de las pesquerías más importantes (Croxall y Nicols 2004). Sin embargo, el aumento de capturas ha impactado negativamente a sus depredadores, incrementando la competencia entre ellos por las presas (Reid et al. 2004). A causa de la pesca excesiva observada en las subá-

reas estadísticas FAO 48.1 y 48.2 (Kock 1991), la Comisión para la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos (CCAMLR, por sus siglas en inglés) impuso un plazo para la temporada de pesca desde 1989-1990 (Meyer et al. 2020), que en la actualidad sigue vigente. A pesar de que en las dos últimas décadas las capturas han ido incrementando (Meyer et al. 2020), se ha observado una pequeña recuperación en los niveles de abundancia del krill que posiblemente sean gracias a las medidas de protección tomadas (Barrera-Oro et al. 2017). Esto puede ser corroborado en el subárea 48, en donde las capturas han aumentado y además se encuentran más concentradas en tiempo y espacio (Trathan et al. 2018). Toda esta evidencia ha generado como interrogante conocer el comportamiento y características de las agregaciones de krill en esta zona.

La evaluación poblacional del krill y los métodos de análisis son realizados según las recomendaciones de las reuniones anuales del subgrupo de acústica del CCAMLR, quienes en su esfuerzo por conservar las especies antárticas han incorporado una serie de estudios y metodologías en las cuales se encuentran la estimación de biomasa acústica del método 1 y 2. El método 1 (Hewitt et

al. 2004) utiliza un par de frecuencias (Greenlaw y Johnson 1983) y una ecuación de TS (Wiebe et al. 1990; Greene et al. 1991). El método 2 (Greene et al. 1991), utiliza tres pares de frecuencias (Greenlaw y Johnson 1983) y la ecuación simplificada SDWBA (Stochastic Distorted Wave Born Approximation) de TS de Demer y Conti (2006). Los objetivos del componente acústico en estos cruceros científicos fueron estimar la distribución y biomasa del krill utilizando estos dos métodos.

En los diferentes estudios se ha podido observar que el krill forma diferentes tipos de agregaciones (Kalinowski y Witek 1985) espacio-temporales (Murphy et al. 1988). Este tipo de comportamiento agregativo está influenciado por factores físicos como el oxígeno disuelto (Brierley y Cox 2010), corrientes, turbulencia, *eddies* (Pinel-Alloul 1995), entre otros. Además, otros factores tales como reproducción, alimentación, beneficios energéticos y evasión de los depredadores (Ritz 2000). El krill logra escapar de sus depredadores migrando verticalmente hacia el fondo durante el día donde es menos visibles (Ritz 1994). Asimismo, aprovecha las capas de hielo para ocultarse (Reiss et al. 2017). Estos compor-

tamientos han sido estudiados ampliamente con redes de arrastre y métodos acústicos (Tarling et al. 2002), encontrándose que el krill tiene una gran capacidad de natación y mantiene agregaciones a mesoescala (Zhou et al. 2004).

El presente trabajo tiene como objetivos caracterizar las variaciones y distribución espacial de las agregaciones de krill en la subárea antártica FAO 48.1, sobre la base de los registros acústicos detectados automáticamente en el estrecho de Bransfield y alrededores de la Isla Elefante durante tres campañas científicas antárticas estivales (2018, 2019 y 2020).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La zona de estudio se ubicó en el estrecho de Bransfield y alrededores de la Isla Elefante que corresponden a la subárea estadística FAO 48.1 (Figura 1). Se realizaron tres campañas antárticas estivales (ANTAR). El diseño de muestreo acús-

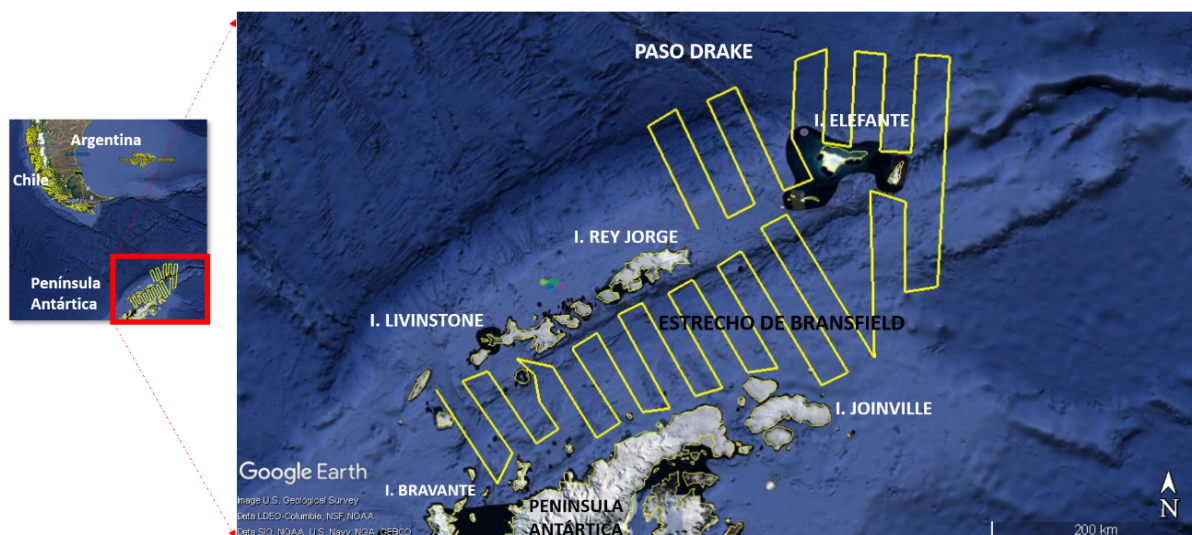


Figura 1. Área de estudio y trayecto planificado (líneas amarillas) para la campaña ANTAR XXVI (fuente: Google Earth).
Figure 1. Study area and planned path (yellow lines) for the ANTAR XXVI survey (source: Google Earth).

tico fue de tipo sistemático estratificado con transectas paralelas con longitudes entre 40 y 120 mn de largo y una separación de 15 mn (Simmonds y MacLennan 2005; AMRL 2011; Cossio y Reiss 2011). La prospección acústica comprendió un promedio de 24 transectas en 13 días efectivos de operación en el mar, principalmente en la primera quincena de enero de cada año.

Datos acústicos

Los datos acústicos fueron recolectados utilizando una ecosonda científica multifrecuencia EK80 (SIMRAD) con cinco frecuencias nominales de 18, 38, 70, 120 y 200 kHz y transductores de tipo de haz dividido: ES18-11, ES38-7, ES70-7C, ES120-7C y ES200-7C kHz, instalados en un blíster retráctil localizado en la quilla de la embarcación BAP “Carrasco” a 5,95 m de la superficie del mar. Estos datos acústicos estuvieron referenciados con la hora, fecha y posición geográfica.

La calibración de la ecosonda se realizó previo al inicio del muestreo acústico, siguiendo las recomendaciones técnicas estándares de Foote (1990) y Demer et al. (2015). La misma se realizó frente a la Bahía Almirantazgo de la Isla Rey Jorge-Islands Shetland del Sur (latitud: 062° 05,62' S, longitud: 058° 27,15' W, profundidad promedio de inmersión esfera: 33 m). El blanco de referencia utilizado para calibrar las cinco frecuencias fue una esfera de carburo de tungsteno (WC) de 38,1 mm de diámetro.

La transmisión de los pulsos sonoros fue de manera simultánea y en el modo de onda continua (CW) en todas las frecuencias. Se utilizó el programa EK80 (versión 1.10.3 en la campaña ANTAR XXV y 1.12.2 en las campañas ANTAR XXVI y XXVII). La duración de pulso fue de 0.512 ms y el rango de grabación para todas las frecuencias fue hasta los 500 m de profundidad. La Unidad Básica de Muestreo (UBM; Simmonds y MacLennan 2005) fue de 1 mn. La emisión de los pulsos de sonido fue máxima. Cuando

se observó desincronización de la ecosonda (aparición de falsos ecos), el intervalo de disparo de la ecosonda fue cambiado a 500 ms. La velocidad de navegación nominal para la adquisición de datos acústicos fue de 10 nudos (kn, 18 km h⁻¹). El almacenamiento de los datos fue en formato propietario *.raw de SIMRAD.

Datos biológicos

Se ejecutaron muestreos de pesca utilizando una red IKMT (Isaac-Kidd Midwater Trawls) cuyas dimensiones fueron 1,8 m de abertura vertical y 2,54 m² de área total de boca. El tamaño de malla fue de 505 µm, y un flujómetro (General Oceanics Modelo 2030 RC) que permitió cuantificar el volumen de agua filtrada. Las estaciones de lances programados fueron ejecutados a la profundidad donde se registraban los ecotrazos de krill detectados y visualizados en la pantalla de la ecosonda. La velocidad de arrastre promedio fue de 2,3 kn y el tiempo promedio de arrastre efectivo fue aproximadamente 20 min. Los lances fueron agrupados por área geográfica (Tabla 1).

Datos oceanográficos

Se efectuaron estaciones oceanográficas utilizando el CTDO Sea Bird Electronics 9 plus, el cual permitió la cuantificación de los parámetros físicos. La profundidad máxima muestreada fue de 1.000 m. Se obtuvieron registros continuos de alta frecuencia (cada metro) de la presión (profundidad), conductividad (salinidad), temperatura y oxígeno de la columna de agua. El tiempo que tomó la ejecución de las estaciones oceanográficas (lanzamiento de roseta con CTDO) fue aproximadamente de una hora en promedio.

Procesamiento de los datos acústicos

Para cada ecograma se realizó un procesamiento eliminando señales no biológicas e interferencias, como así también se corrigieron las líneas de

Tabla 1. Rango de tallas del krill recolectados con la IKMT y sus respectivos rangos de ΔSv para cada par de frecuencias utilizados en el método 1. Estrecho de Bransfield (EB), Norte de la Isla Joinville (JV) e Isla Elefante (IE).

Table 1. Size range of krill collected with the IKMT and their respective ΔSv ranges for each pair of frequencies used in method 1. Bransfield Strait (EB), North Joinville Island (JV) and Elephant Island (IE).

| ANTAR N° | Clúster | Rango de talla (mm) | Transecta (N° lances) | Rango de talla (mm) | Rango de ΔSv (dB) para cada par de frecuencia (kHz) | | | Área geográfica |
|-----------------------------|---------|---------------------|-----------------------|---------------------|--|------------|------------|-----------------|
| | | | | | 120-38 | 200-120 | 200-38 | |
| XXV (verano austral 2018) | A | 13-57 | 1 al 13 (31) | 10-60 | 2,5 a 17,7 | -0,5 a 6,8 | 2,0 a 24,5 | EB |
| | B | 19-58 | 14 al 17 (12) | 20-60 | 2,5 a 14,7 | -0,5 a 2,1 | 2,0 a 16,8 | JV |
| | C | 13-59 | 18 al 23 (28) | 10-60 | 2,5 a 17,7 | -0,5 a 6,8 | 2,0 a 24,5 | IE |
| XXVI (verano austral 2019) | A | 12-50 | 1 al 11 (13) | 10-50 | 4,6 a 17,7 | -0,5 a 6,8 | 4,1 a 24,5 | EB |
| | B | 12-62 | 12 al 18 (18) | 10-60 | 2,5 a 17,7 | -0,5 a 6,8 | 2,0 a 24,5 | JV |
| | C | 12-62 | 19 al 28 (18) | 10-60 | 2,5 a 17,7 | -0,5 a 6,8 | 2,0 a 24,5 | IE |
| XXVII (verano austral 2020) | A | 14-60 | 3 al 11 (19) | 10-60 | 2,5 a 17,7 | -0,5 a 6,8 | 2,0 a 24,5 | EB |
| | B | 17-54 | 12 al 18 (13) | 20-60 | 2,5 a 14,7 | -0,5 a 2,1 | 2,0 a 16,8 | JV |
| | C | 17-61 | 19 al 23 (10) | 20-60 | 2,5 a 14,7 | -0,5 a 2,1 | 2,0 a 16,8 | IE |

fondo. Las señales indeseadas fueron extraídas aplicando la variable *background noise removal* (De Robertis y Higginbottom 2007). Además, se realizó un remuestreo cada dos pings utilizando la media y aplicando la variable *resample by number of pings*. Los pares de frecuencias aplicados fueron de acuerdo con el método 1 de Greene et al. (1991) y el método 2 de Conti y Demer (2006), usando la variable *minus*. Se utilizó la variable *range bitmap* para limitar los rangos ΔSv de acuerdo con cada par de frecuencia. Cada combinación de frecuencias fue usada para extraer los datos sobre el ecograma de frecuencia nominal. El par de frecuencia de $Sv_{200-38 \text{ kHz}}$ se aplicó para la profundidad 0 a 100 m, mientras que la de $Sv_{120-38 \text{ kHz}}$ de 100 a 250 m.

Para la detección de las agregaciones de krill se utilizaron el par de frecuencias $Sv_{120-38 \text{ kHz}}$ en el ecograma sintético aplicando la automatización con la función *EVSchoolDetect* de *EchoviewR* (Harrison et al. 2015). Posteriormente, se realizó la exportación de las planillas de cálculos de las

celdas y regiones en formato *.csv (valores separados por comas). De estas planillas de celdas, se utilizaron las variables descritas en la Tabla 2.

Análisis de los datos

Caracterización de las agregaciones del krill

Para evaluar la correlación y excluir las variables que tengan características similares se realizó un análisis de correlación de Pearson. Para la caracterización de las agregaciones de krill fueron usadas las variables morfométricas: profundidad, altura, longitud, volumen, compacidad; variables estadísticas de las agregaciones: oblicuidad y coeficiente de variación; y variables energéticas: NASC (Tabla 2). Luego, con el objetivo de reducir la dimensionalidad de las variables se aplicó un PCA. Posteriormente, se retuvieron aquellos componentes principales que explican alrededor de 80% de la variabilidad de los datos. Finalmente, usando las cargas de los componentes retenidos se procedió a realizar un

Tabla 2. Descriptores acústicos usados para la caracterización de las agregaciones de krill.
 Table 2. Acoustic descriptors used for the characterization of krill aggregations.

| Nombre | Unidad | Descripción |
|--|---------------|--|
| Coefficiente dispersión de área náutica (NASC) | $m^2 mn^{-2}$ | Es una medida de dispersión de área en lugar de dispersión de volumen. Se calcula al integrar una región, celda o selección. |
| Profundidad | m | Distancia lineal y vertical promedio desde la superficie hasta la agregación o cardumen. |
| Altura | m | Una medida de la extensión vertical de una agregación o cardumen, límite superior menos límite inferior. |
| Longitud | m | Longitud de la agregación/cardumen |
| Volumen | m^3 | Volumen de la agregación/cardumen |
| Oblicuidad | | Mide la simetría de la distribución de un conjunto de datos Sv (dB en m^2). Una distribución sesgada se inclina hacia la izquierda o hacia la derecha. |
| Compacidad de imagen | | Mide la relación entre el perímetro (cuadrado) de la agregación/cardumen observado y el área del cardumen observada. Es decir, un círculo tiene una imagen compacta de 1. |
| Coefficiente de variación | | Es la desviación estándar dividida por la media, expresada como porcentaje. Esto proporciona un método para comparar la dispersión de los datos de Sv en agregaciones con valores de Sv medios muy diferentes. |

análisis de agrupamiento jerárquico (*clustering*). Todos estos análisis se realizaron usando el paquete FactoMineR en R.

Para describir los clústeres se hicieron gráficos boxplot y biplot por año de cada variable, realizado con los paquetes de ggplot2 y factoextra en R. Además, a fin de determinar la ubicación espacio-temporal de estos clústeres se hizo un ploteo georreferenciado de los clústeres por cada crucero. Para determinar las diferencias de clúster por años, se realizó un ANOVA de cada variable vs año, filtrando cada clúster.

Relación del krill con los parámetros oceanográficos

Para visualizar y analizar las condiciones oceanográficas superficiales de cada campaña se graficaron en una carta con la finalidad de describir patrones de las variables oceanográficas. Para cada clúster obtenido se procedió a realizar un

análisis GAM utilizando los valores NASC de krill asociados con los parámetros oceanográficos superficiales obtenidos.

RESULTADOS

Caracterización de las agregaciones de krill

Se utilizó un total de 22.221 agregaciones de krill y se analizó el PCA para las campañas. Fueron retenidos los tres primeros componentes, explicando 81% de la varianza acumulada. La primera dimensión se asoció positivamente con el volumen, la longitud y la compacidad de imagen, también tuvo un efecto positivo en el segundo componente (Figura 2). El valor de la altura, la oblicuidad, el coeficiente de variación y NASC tuvieron efecto positivo en la dimensión 1 pero

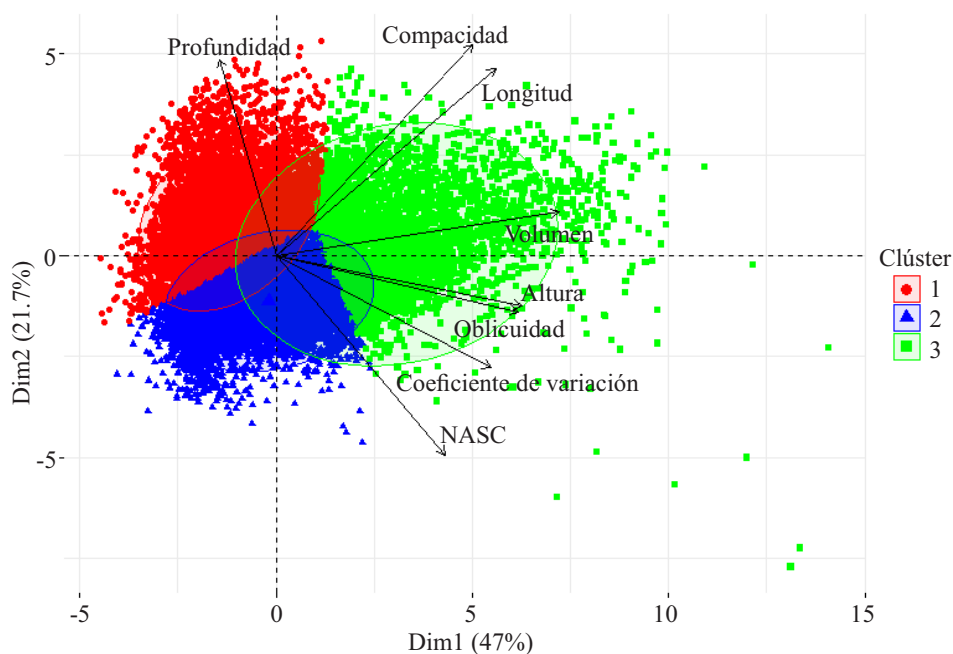


Figura 2. Biplot-PCA regiones de krill por clústeres.
 Figure 2. Biplot-PCA krill's regions by clusters.

negativo en la dimensión 2. La variable de profundidad del enjambre indica migraciones verticales con efecto positivo en el segundo componente, pero negativo en el primero. Se observó que la profundidad media del enjambre presentó una relación inversa con variable de retrodispersión acústica (NASC), es decir, a mayor profundidad menores valores de retrodispersión acústica (Figura 2).

La dimensión 1 estuvo asociada a las variables morfométricas como la altura, longitud y volumen, mientras que la dimensión 2 se asoció al NASC, la profundidad y la compacidad, siendo las agregaciones de krill más pequeñas, compactas y profundas. Finalmente, la oblicuidad y el coeficiente de variación estuvieron asociados a la dimensión 3, que estarían sujetos a la simetría y dispersión de datos de cada agregación.

Luego del análisis PCA, sobre la base de las cargas de las variables en los tres primeros componentes principales, se procedió a realizar un análisis de agrupamiento de las agregaciones de

krill (Figura 3). Ejecutando el método de *clustering* jerárquico, se logró distinguir tres grupos con diferentes características (Tabla 3). De los 22.221 clústeres obtenidos, 9.437 (42%) pertenecen al primer clúster, 8.618 (39%) al segundo y 4.166 (19%) al tercero, siendo el primero el de mayor número de agregaciones de krill:

- Clúster I. Este grupo se caracterizó por tener las agregaciones de krill con la menor altura media, menor a 2 m con alcance hasta los 17 m y un largo de 148 m. Estas agregaciones fueron registradas desde la superficie hasta los 250 m de profundidad, con un promedio de 80 m. Los valores de retrodispersión acústica (NASC) fueron relativamente bajos ($7 \text{ m}^2 \text{ mn}^{-2}$). La oblicuidad (falta de simetría) fue baja (en promedio 2). Los valores de compacidad de imagen se encontraron en promedio en 491; mientras que el coeficiente de variación se mostró bajo (en promedio 97). El volumen promedio se mantuvo 255 m^3 . Este grupo de mayor pro-

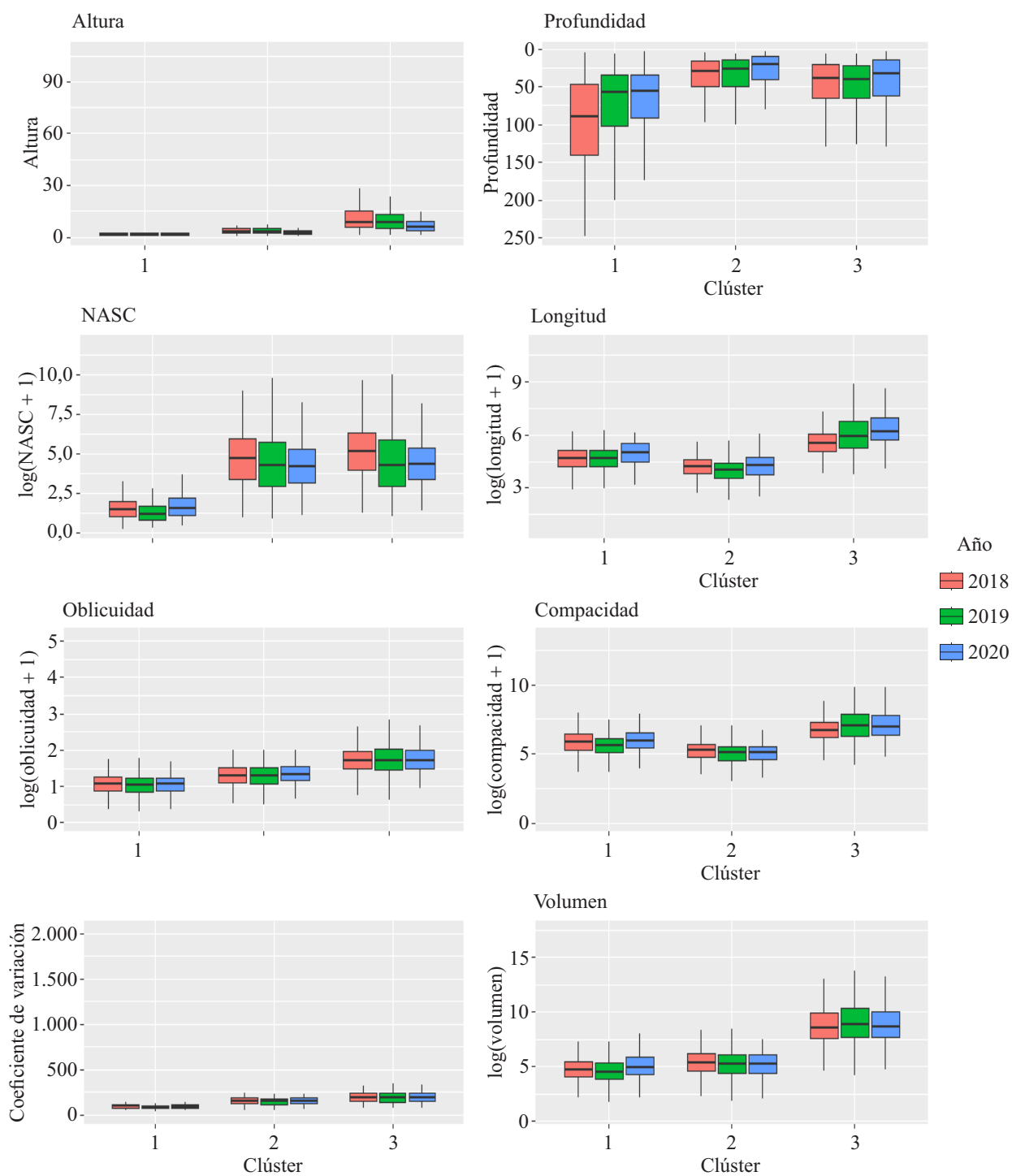


Figura 3. Boxplot de los clústeres por características de las agregaciones de krill por descriptor acústico.
 Figure 3. Boxplot of clusters by characteristics of krill aggregations per acoustic descriptor.

Tabla 3. Promedio y desviación estándar (Prom + sd) de cada descriptor acústico para cada clúster.
 Table 3. Average and standard deviation (Prom + sd) of each acoustic descriptor for each cluster.

| Descriptor acústico | Clúster I | Clúster II | Clúster III |
|---------------------------|-----------|-------------|---------------------|
| | Prom + sd | Prom + sd | Prom + sd |
| NASC ($m^2 mn^2$) | 7 ± 20 | 356 ± 1.391 | 637 ± 4.536 |
| Profundidad (m) | 81 ± 57 | 34 ± 28 | 49 ± 42 |
| Altura (m) | 2 ± 1 | 4 ± 2 | 11 ± 10 |
| Longitud (m) | 148 ± 128 | 75 ± 51 | 849 ± 2.020 |
| Volumen (m^3) | 255 ± 511 | 427 ± 697 | 207.412 ± 1.457.917 |
| Oblicuidad | 2 ± 0,94 | 3 ± 1,25 | 6 ± 5,64 |
| Compacidad | 491 ± 900 | 202 ± 233 | 2.436 ± 12.449 |
| Coefficiente de variación | 97 ± 32 | 158 ± 53 | 213 ± 110 |

fundidad y de menor energía acústica retrodispersada estuvo asociado principalmente a la zona de los alrededores de la Isla Elefante entre los Antar XXV (2018) y XXVI (2019).

- Clúster II. Este grupo se caracterizó por tener las agregaciones de krill con una altura media de 4 m en promedio, ubicadas desde la superficie hasta los 208 m y con una profundidad media de 34 m. Los valores de energía acústica retrodispersada NASC promediaron los $356 m^2 mn^2$ y la longitud de la agregación fue de 75 m. La oblicuidad fue ligeramente mayor al clúster 1, con un valor de 3. Los valores de compacidad de la imagen fueron de 202, el coeficiente de variación es idéntico al clúster I, con valor de 202 en promedio. El volumen de los cardúmenes se mantuvo con un promedio de $427 m^3$.
- Clúster III. Las alturas de las agregaciones de krill de este grupo fueron mayores hasta los 107 m con un promedio de 11 m. En el caso de la profundidad, se encontraron hasta los 247 m y el valor promedio fue de 49 m. La energía acústica retrodispersada promedio fue de $637 m^2 mn^2$ mientras que la longitud promedio fue mayor que los dos primeros clústeres, 849 m. Asimismo, la oblicuidad también fue mayor,

con un promedio de 6. El coeficiente de variación tuvo un promedio de 213. Los volúmenes de este clúster fueron de mayor magnitud, con un promedio de $207.412 m^3$.

Las agregaciones de krill del clúster I se caracterizaron principalmente por estar más profundas, tener menos altura y volumen, además de tener menor energía acústica retrodispersada. El clúster II se caracterizó por tener menor profundidad y longitud, además de tener las agregaciones de menor compacidad. El clúster III fue de profundidad intermedia, pero con mayor valor del resto de variables (Figura 3).

El clúster I (color rojo) de agregaciones del krill se ubicó al norte, este y sur de la Isla Elefante en 2018 (Figura 4). Para el 2019 este grupo se encontró con mayor presencia en los alrededores de la Isla Elefante, alcanzando las zonas del noreste de las Islas Rey Jorge y norte de Joinville. Para ambos años se observaron agregaciones aisladas en el Estrecho de Bransfield. En 2020 también se localizó este clúster alrededor de la Isla Elefante, aunque con mayor intensidad en la zona sur. Además, se distribuyó de manera constante a lo largo del Estrecho de Bransfield hasta el norte de Joinville.

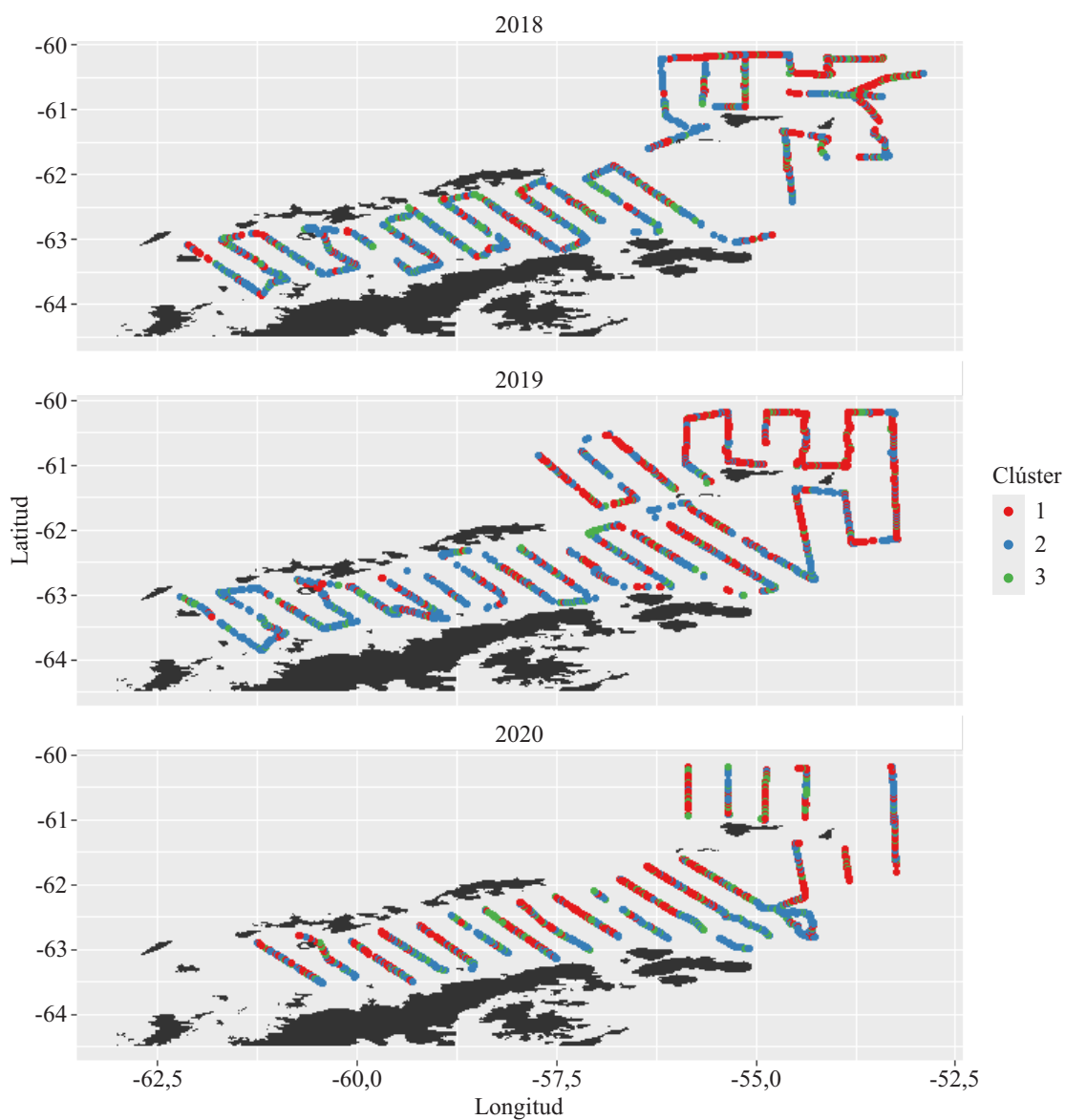


Figura 4. Clústeres de krill georreferenciados por campaña científica en la subárea FAO 48.1.

Figure 4. Krill clusters georeferenced per scientific survey in FAO subarea 48.1.

En el clúster II (color azul) las agregaciones se encontraron distribuidas en toda la zona de estudio, con mayor presencia en el Estrecho de Bransfield en 2018 y 2019. Sin embargo, se registró muy poca presencia de agregaciones de krill alrededor de la Isla Elefante y mayor en la zona norte de la Isla Trinidad. En 2020, este clúster se distri-

buyó con menor presencia en toda la zona de muestreo, con excepción de la zona al norte de Joinville y al este de Isla Elefante.

En 2018, el clúster III (color verde) se observó en parches aislados en tres zonas, esto es, alrededor de la Isla Elefante, en el norte del Estrecho de Bransfield y al sur de Isla Snow. En 2019, se dis-

tribuyó de manera aleatoria en toda la zona de estudio, mientras que para 2020 se distribuyó en pequeñas agregaciones en todo el recorrido del crucero.

Para observar las diferencias entre clústeres por año, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) teniendo en cuenta los descriptores acústicos para los distintos años. Los resultados presentaron un $p < 0,001$, es decir, que todas las relaciones fueron significativas, a excepción de la oblicuidad y el coeficiente de variación en el clúster I (Tabla 4). Estos resultados de ANOVA indican que sí existieron diferencias de cada clúster por años.

Parámetros oceanográficos superficiales

La temperatura superficial del mar durante la expedición Antar XXV se encontró en un rango de $-1,0$ a $1,5$ °C, siendo el sur de islas Shetland, los alrededores de la Isla Elefante y el noreste de la Isla Joinville las más cálidas. Durante la expedición Antar XXVI, se observó un ligero calentamiento en los alrededores de la Isla Elefante, observándose temperaturas de hasta 2 °C. Durante la campaña Antar XXVII, se observó un calentamiento más elevado que llegó hasta 3 °C en la

zona norte de todo el Estrecho de Bransfield y al norte de la Isla Elefante. Para las tres campañas se observó una temperatura más baja al norte de la Isla Joinville (Figura 5, izquierda).

La salinidad durante la campaña Antar XXV registró un rango de $33,5$ a $34,5$, siendo la zona menos salina el noreste de la Isla Elefante y la más salina el sur del Estrecho de Bransfield, con un valor de $34,5$. En la siguiente campaña, la salinidad alcanzó valores cercanos a $34,0$ en el Estrecho de Bransfield. Finalmente, en la campaña Antar XXVII se registró una variabilidad de la salinidad en el Estrecho de Bransfield, encontrándose núcleos de mayor salinidad ($34,5$) al norte de la Península Antártica y la Isla Joinville. Al sur de Islas Shetland del Sur y alrededores de la Isla Elefante, la salinidad fue de $34,0$ aproximadamente (Figura 5, centro).

Con respecto al oxígeno disuelto, no se observaron patrones como en las otras dos variables. Durante la campaña Antar XXV se observaron núcleos de 6 ml l⁻¹ dentro del Estrecho de Bransfield, mientras que en los alrededores de la Isla Elefante los valores de oxígeno fueron de 7 ml l⁻¹ en promedio. Durante la campaña Antar XXVI, los valores de oxígeno fueron altos (~ 10 ml l⁻¹) en casi toda la zona de estudio (desde los

Tabla 4. Resumen de los análisis de varianza para cada variable analizada tomando como factor el año. Los asteriscos indican el nivel de significancia del análisis: ‘***’ = 0,001; ‘ ’ = 1.

Table 4. Summary of analyzes of variance for each variable analyzed taking the year as a factor. Asterisks indicate the level of significance of the analysis. ‘***’ = 0.001; ‘ ’ = 1.

| Variable | Clúster I | Clúster II | Clúster III |
|---|-----------|------------|-------------|
| NASC (m ² mn ⁻²) | *** | *** | *** |
| Profundidad (m) | *** | *** | *** |
| Altura (m) | *** | *** | *** |
| Longitud (m) | *** | *** | *** |
| Volumen (m ³) | *** | *** | *** |
| Oblicuidad | | *** | *** |
| Compacidad | *** | *** | *** |
| Coefficiente de variación | | *** | *** |

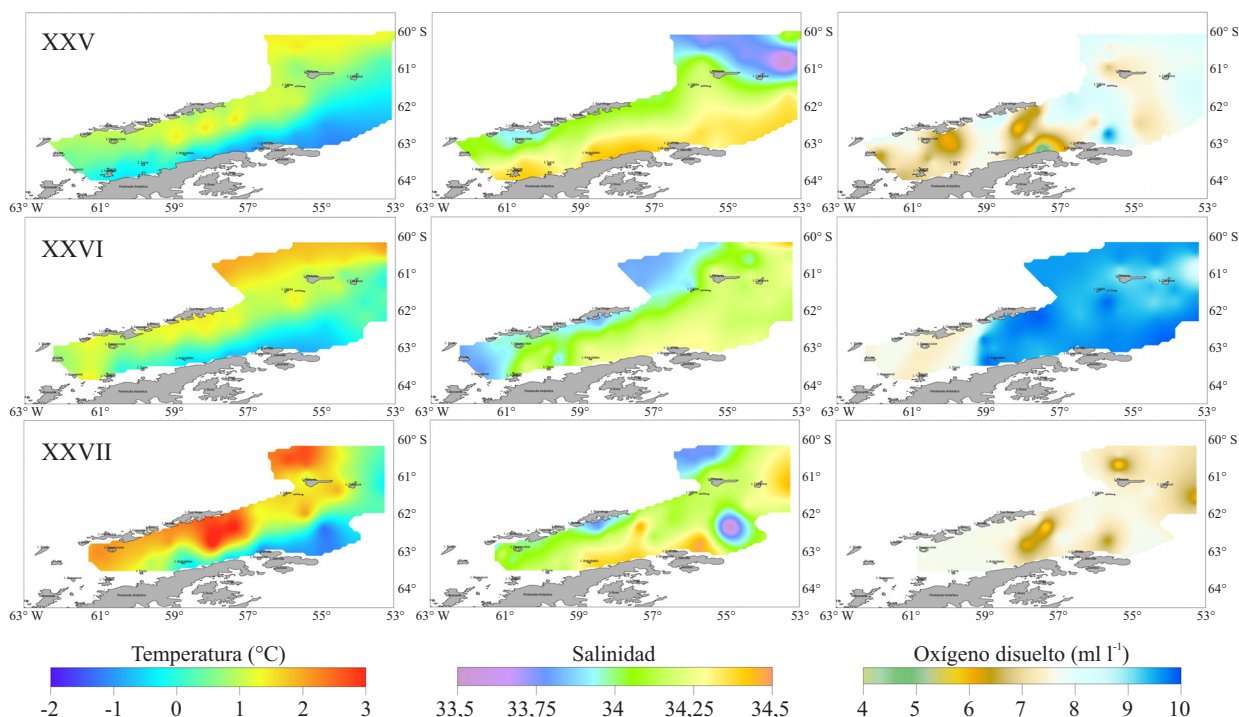


Figura 5. Temperatura, salinidad y oxígeno disuelto registrados durante los tres crueros.
 Figure 5. Temperature, salinity and dissolved oxygen recorded during the three cruises.

alrededores de la Isla Elefante llegando al sur de la Isla Nelson), para luego disminuir hasta 7 ml l^{-1} . Por último, durante la Antar XXVII, los valores de oxígeno se mantuvieron en $7,5 \text{ ml l}^{-1}$, con excepción de un par de núcleos con concentraciones inferiores que se ubicaron al norte de la Península Antártica y al norte de la Isla Elefante (Figura 5, derecha).

Relación del krill con las condiciones oceanográficas superficiales

Se relacionaron las agregaciones de krill con las variables oceanográficas obtenidas en cada estación. A partir de esta relación, se realizó un modelo GAM ($\log(\text{NASC} + 1) \sim s(\text{OSM}) + s(\text{TSM}) + s(\text{SSM})$), de familia gaussiana, para analizar los valores NASC del krill con las variables oceanográficas superficiales. Así, se observó que las tres variables resultaron significativas con

$p < 0,001$ para explicar la distribución del krill. La desviación explicada fue de 13,3% y el r^2 de 0,132. La temperatura se encontró en un rango preferente de $-0,5$ a $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que la salinidad estuvo entre 34,0 a 34,4 y el oxígeno disuelto entre $6,5$ y $8,0 \text{ ml l}^{-1}$ (Figura 6).

El promedio de temperatura para los tres clústeres fue de $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que para la salinidad fue de 34,14 y, finalmente, el oxígeno estuvo en $8,16 \text{ ml l}^{-1}$.

DISCUSIÓN

Se han realizado diversos tipos de estudios que han permitido agrupar al krill usando análisis de PCA, ya sea según sus características biológicas (Trathan et al. 1993; Watkins et al. 1999) como morfométricas, utilizando datos hidroacústicos

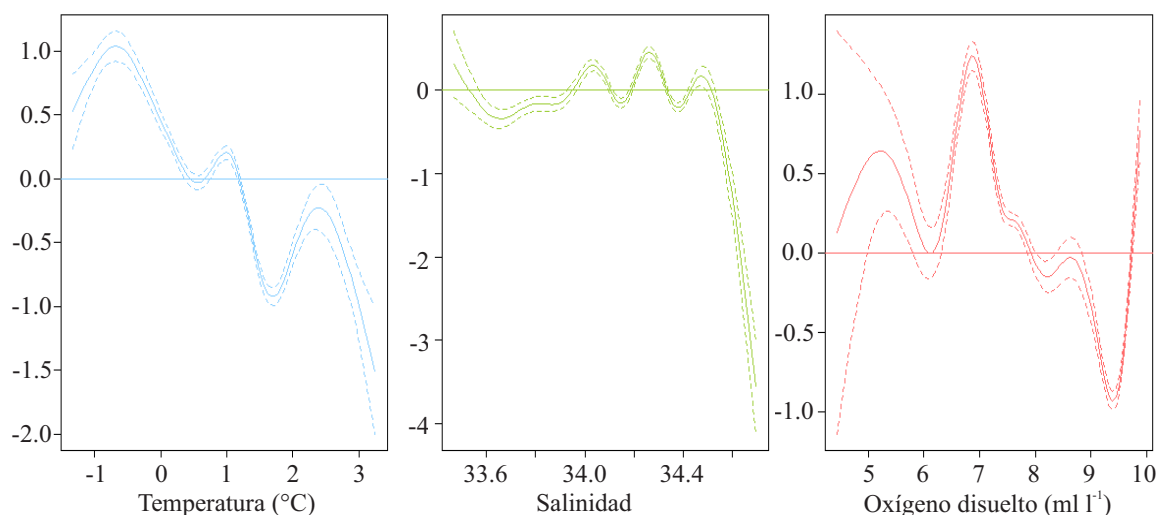


Figura 6. Gráficos GAM de las regiones de krill para cada variable oceanográfica.
 Figure 6. GAM graphs of krill regions for each oceanographic variable.

(Miller et al. 1993; Tarling et al. 2009). Cuando se usan características biológicas se puede agrupar ya sea por madurez sexual, tamaños y sexualidad, entre otras. Pero cuando se utilizan metodologías hidroacústicas es posible emplear variables morfométricas de cardúmenes o agregaciones, posicionales y energéticas. Además, es factible agregar variables de hidrografía en los análisis de PCA (Krafft et al. 2010) mejorando la caracterización de los clústeres de krill. Varios autores (Kalinowski y Witek 1985; Tarling et al. 2009) describen que es posible encontrar una gran variedad de tamaños e interrelaciones de las agregaciones de krill. Sin embargo, en este trabajo se presentan tres clústeres con características acústicas, los cuales marcan diferencias significativas de variables tales como profundidad, longitud, altura, volumen y valores de energía acústica retrodispersada de las agregaciones.

Los resultados obtenidos en el presente estudio son similares a otros realizados en la zona del Estrecho de Bransfield (Kalinowski y Witek 1985; Tarling et al. 2009), donde fueron clasificados tres grupos: dos predominantes y un tercero con menor cantidad de agregaciones. Comparando el clúster I de Tarling et al. (2009) con el clús-

ter I de este estudio, se observa que ambos comparten similitudes con respecto a su tamaño y compacidad. El clúster III de este trabajo puede ser comparado con el segundo clúster de Tarling et al. (2009). Estos clústeres son descritos como “super” agregaciones, los cuales presentan grandes dimensiones con varios kilómetros de longitud y grandes volúmenes.

Sobre la base de nuestros resultados, se observaron diferencias significativas de cada descriptor acústico con respecto al período de estudio. Este resultado difiere de que detallan Brierley y Cox (2014), quienes encontraron que los tamaños de agregaciones de krill no cambian, inclusive cuando las biomásas varían, aunque las agregaciones de krill son muy variables a microescala (Tarling et al. 2009). En este estudio se ha demostrado que los tres tipos de clúster están ubicados en las diferentes zonas de estudio, pero que presentan algunas preferencias. Existe un patrón de comportamiento para 2018 y 2019, donde se evidencia que el clúster I (color rojo) se encuentra principalmente y con mayor presencia en los alrededores de la Isla Elefante. Contrariamente, en 2020 este grupo se encontró distribuido en toda la zona de estudio; además, en este año se presentó una

mayor biomasa (7,7 millones de toneladas). A pesar de que en ese año se observó un incremento en la biomasa, los patrones de comportamiento no se han visto influenciados drásticamente, pero sí cambios en su distribución espacial.

Relación de parámetros ambientales con las agregaciones de krill

La Península Antártica y alrededores han presentado temperaturas que fueron las más cálidas de las últimas tres décadas, con una anomalía térmica de + 1 °C (IMARPE 2020). Este fenómeno ha producido potencialmente un cambio en los patrones de comportamiento del krill en toda el área de estudio, además de un desplazamiento de abundancia al Estrecho de Bransfield. Esto puede deberse a que el krill es una especie estenotérmica que evita los cambios bruscos de temperatura acercándose a los frentes polares antárticos (Krafft et al. 2010). Se realizaron análisis GAM para cada clúster pero no se encontró ninguna diferencia significativa de las variables, a pesar del calentamiento que hubo en 2020, resultados similares a los encontrados por Miller et al. (1993).

Los alrededores de la Isla Elefante son una zona de altas densidades de fitoplancton (Villafañe et al. 1993) y está influenciada por los patrones de circulación de las principales masas de agua (Holm-Hansen et al. 1997) que convergen y se mezclan sobre una plataforma continental extensa (Helbling et al. 1993). Asimismo, podrían estar influenciadas por las condiciones meteorológicas (Villafañe et al. 1995) que además podrían afectar la tipología de concentración del clúster I, que se encuentra más profundo y disperso, pero más pequeño en relación de altura, longitud y volumen. A diferencia de la Isla Elefante, el Estrecho de Bransfield es una zona cubierta con mejores condiciones temporales de mar. Aquí se encontraron agregaciones con mayor longitud, volumen, altura y valores elevados de energía acústica retrodispersada, que pertenecen específicamente al clúster III.

AGRADECIMIENTOS

A todos los colegas que navegaron en el BAP “Carrasco” y recolectaron, procesaron y analizaron los datos acústicos. También a los coautores de este trabajo que con sus aportes permitieron enriquecer la calidad de la investigación. Finalmente, un agradecimiento especial a Ramiro Castillo por la oportunidad de participar en la campaña Antártica de 2019 (Antar XXVI).

REFERENCIAS

- AGNEW D. 1992. Distribution of krill (*Euphausia superba* Dana) catches in the South Shetlands and South Orkneys. Selected scientific papers SC-CAMLR-SSP/9. Hobart: CCAMLR. p. 287-303.
- ALONSO S, SWITZER P, MANGEL M. 2003. An ecosystem-based approach to management: using individual behavior to predict the indirect effects of Antarctic krill fisheries on penguin foraging. *J Appl Ecol.* 40: 692-702.
- [AMLR] ANTARCTIC MARINE LIVING RESOURCES. 1998. AMLR 1997/1998 Field Season Report. Objectives, accomplishments and tentative conclusions. En: MARTIN J, editor. Southwest Fisheries Science Center. Antarctic Ecosystem Research Group, Administrative Report LJ-98-07. 166 p.
- [AMLR] ANTARCTIC MARINE LIVING RESOURCES. 2011. AMLR 2009/2010 Field Season Report. Objectives, accomplishments and tentative conclusions. En: VAN CISE A, editor. Southwest Fisheries Science Center. Antarctic Ecosystem Research Division NOAA-TM-NMFS-SWFSC-470. 66 p.
- ARNTZ WE. 1997. Investigación antártica en biología marina: situación actual, proyectos internacionales y perspectivas. *Bol R Soc Esp Hist*

- Nat. 93 (1-4): 13-44.
- BAR-ON Y, PHILIPS R, MILO R. 2018. The biomass distribution on Earth. Proc. Natl Acad Sci USA. 115 (25): 6506-6511.
- BARRERA-ORO E, MARSCHOFF E, AINLEY D. 2017. Changing status of three notothenioid fish at the South Shetland Islands (1983-2016) after impacts of the 1970-80s commercial fishery. Polar Biol. 40 (10): 2047-2054. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00300-017-2125-0>
- BRIERLEY A, COX M. 2010. Shapes of krill swarms and fish schools emerge as aggregation members avoid predators and access oxygen. Curr Biol. 20 (19): 1758-1762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.08.041>
- [CCAMLR] COMMISSION FOR THE CONSERVATION OF ANTARCTIC MARINE LIVING RESOURCES. 2000. Report of the B0 Workshop. WG-EMM-00/21 Rev. 1. La Jolla.
- [CCAMLR] COMMISSION FOR THE CONSERVATION OF ANTARCTIC MARINE LIVING RESOURCES. 2007. Report of the XXVI Meeting of the Scientific Committee. SC-CAMLR-XXVI. Hobart: CCAMLR. 4 p.
- CONTI S, DEMER D. 2006. Improved parameterization of the SDWBA for estimating krill target strength. ICES J Mar Sci. 63 (5): 928-935. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2006.02.007>
- COSSIO A, REISS C. 2011. Bioacoustics survey. En: VAN CISE A, editor. Field Season Report. Objectives, accomplishments and tentative conclusions. AMLR 2009/2010. Southwest Fisheries Science Center. Antarctic Ecosystem Research Division NOAA-TM-NMFS-SWF SC-470. p. 12-16.
- CROXALL J, NICOL S. 2004. Management of southern ocean fisheries: global forces and future sustainability. Antarct Sci. 16 (4): 569-584.
- DE ROBERTIS A, HIGGINBOTTOM I. 2007. A post-processing technique to estimate the signal-to-noise ratio and remove echosounder background noise. ICES J Mar Sci. 64: 1282-1291.
- DEMER D, BERGER L, BERNASCONI M, BETHKE E, BOSWELL K, CHU D, DOMOKOS R, DUNFORD A, FÄSSLER S, GAUTHIER S, et al. 2015. Calibration of acoustic instruments. ICES Coop Res Rep. 326. 130 p.
- DEMER D, CONTI S. 2005. New target-strength model indicates more krill in the Southern Ocean. ICES J Mar Sci. 62: 25-32.
- FOOTE K. 1990. Spheres for calibrating an eleven-frequency acoustic measurement system. ICES J Mar Sci. 46: 284-286.
- GASCON V, WERNER R. 2005. Antarctic krill: a case study on the ecosystem implications of fishing. Puerto Madryn: Lighthouse Foundation, Antarctic and Southern Ocean Coalition. 30 p.
- GREENE C, STANTON T, WIEBE P, McCLATCHIE S. 1991. Acoustic estimates of Antarctic krill. Nature. 349 (6305): 110-110. DOI: <https://doi.org/10.1038/349110a0>
- GREENLAW C, JOHNSON R. 1983. Multiple frequency acoustical estimation. Biol Ocean. 2 (2, 3-4): 227-252.
- HARRISON L, COX MJ, SKARET G, HARCOURT R. 2015. The R package EchoviewR for automated processing of active acoustic data using Echoview.
- HELBLING E, AMOS A, SILVA N, VILLAFANE V, HOLM-HANSEN O. 1993. Phytoplankton distribution and abundance as related to a frontal system north of Elephant Island, Antarctica. Antarctic Sci. (1): 25-36.
- HEWITT R, KIM S, NAGANOBU M, GUTIERREZ M, KANG D, TAKAO Y, QUINONES J, LEEG YH, SHING H, KAWAGUCHI S, EMERY J, DEMER D, LOEB V. 2004. Variation in the biomass density and demography of Antarctic krill in the vicinity of the South Shetland Islands during the 1999/2000 austral summer. Deep-Sea Res (II Top Stud Oceanogr). 51: 1411-1419.
- HOLM-HANSEN O, HEWES CD, VILLAFANE VE, HELBLING EW, SILVA N, AMOS T. 1997. Distribution of phytoplankton and nutrients in relation to different water masses in the area

- around Elephant Island, Antarctica. *Polar Biol.* 18 (2): 145-153. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003000050169>
- [IMARPE] INSTITUTO DEL MAR DEL PERÚ. 2020. Estudio del ecosistema pelágico en el Estrecho de Bransfield y alrededores de las Islas Piloto Pardo. Vigésimo Séptima Expedición Científica Peruana a La Antártida: ANTAR XXVII.
- KALINOWSKI J, WITEK Z. 1985. Scheme for classifying aggregations of Antarctic krill. *Biomass Handbook* 27. 9 p.
- KOCK K. 1991. The state of exploitation fish stocks in the Southern Ocean-A review. *Arch Fishchereiwiss.* 41 (1): 1-66.
- KRAFFT B, MELLE W, KNUITSEN T, BAGØIEN 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): 957-968. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00300-010-0774-3>
- MACAULAY M. 1987. Biomass estimates of krill in the Bransfield Strait-Elephant Island ecosystem monitoring area of CCAMLR. SC-CAMLR-VI/BG/46.
- MEYER B, ATKINSON A, BERNARD K, BRIERLEY A, DRISCOLL R, HILL S, MARCHOFF E, MASCHETTE D, PERRY F, REISS C, 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: <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00026-1>
- MILLER D, BARANGE M, KLINDT H, MURRAY A, HAMPTON I, SIEGEL V. 1993. Antarctic krill aggregation characteristics from acoustic observations in the Southwest Atlantic Ocean. *Mar Biol.* 117 (1): 171-183. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00346440>
- MURPHY E, MORRIS D, WATKINS J, PRIDDLE J. 1988. Scales of interaction between Antarctic krill and the environment. En: SAHRHAGE D, editor. *Antarctic Ocean and resources variability*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. p. 120-130.
- NOWACEK D, FRIEDLAENDER A, HALPIN N, HAZEN E, JOHNSTON D, READ A, ESPINASSE B, ZHOU M, ZHU Y. 2011. Super-aggregations of krill and Humpback whales in Wilhelmina Bay, Antarctic Peninsula. *PLoS ONE.* 6: e19173.
- PINEL-ALLOUL P. 1995. Spatial heterogeneity as a multiscale characteristic of zooplankton community. *Hydrobiology.* 300: 17-42.
- REID K, SIMS M, WHITE RW, GILLON K. 2004. Spatial distribution of predator/prey interactions in the Scotia Sea: implications for measuring predator-fisheries overlap. *Deep-Sea Res.* 51: 1383-1396.
- REISS C, COSSIO A, SANTORA J, DIETRICH K, MURRAY A, MITCHELL B, WALSH J, WEISS E, GIMPEL C, JONES C, WATTERS G. 2017. Overwinter habitat selection by Antarctic krill under varying sea-ice conditions: implications for top predators and fishery management. *Mar Ecol Prog Ser.* 568: 1-16. DOI: <https://doi.org/10.3354/meps12099>
- RITZ D. 1994. Social aggregation in pelagic invertebrates. *Adv Mar Biol.* 30: 155-216.
- RITZ D. 2000. Is social aggregation in aquatic crustaceans a strategy to conserve energy? *Can J Fish Aquat Sci.* 57 (S3): 59-67.
- SIEGEL V, KAWAGUCHI S, WARD P, LITVINOV F, SUSHIN V, LOEB V, WATKINS J. 2004. Krill demography and large-scale distribution in the southwest Atlantic during January/February 2000. *Deep-Sea Res (II Top Stud Oceanogr).* 51 (12-13): 1253-1273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.06.013>
- SIMMONDS E, MACLENNAN DN. 2005. *Fisheries acoustics: theory and practice*. 2nd ed. Oxford: Blackwell. 437 p.
- SMETACEK V, NICOL S. 2005. Polar ocean ecosystems in a changing world. *Nature.* 437: 362-368. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature04161>
- TARLING G, JARVIS T, EMSLEY S, MATTHEWS J. 2002. Midnight sinking behavior in *Calanus finmarchicus*, a response to satiation or krill

- predation? *Mar Ecol Prog Ser.* 240: 183-194.
- TARLING G, KLEVJER T, FIELDING S, WATKINS J, ATKINSON A, MURPHY E, KORB R, WHITEHOUSE M, LEAPER R. 2009. Variability and predictability of Antarctic krill swarm structure. *Deep-Sea Res (II Top Stud Oceanogr).* 56 (11): 1994-2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2009.07.004>
- TRATHAN P, HILL S. 2016. The importance of krill predation in the Southern Ocean. En: SIEGEL V, editor. *Biology and ecology of Antarctic krill.* Springer. p. 321-350.
- TRATHAN P, WARWICK-EVANS V, HINKE J, YOUNG E, MURPHY E, CARNEIRO A, DIAS M, KOVACS K, LOWTHER A, GODO O, et al. 2018. Managing fishery development in sensitive ecosystems: identifying penguin habitat use to direct management in Antarctica. *Ecosphere.* 9: e02392.
- VILLAFANE VE, HELBLING EW, HOLM-HANSEN O. 1993. Phytoplankton around Elephant Island, Antarctica. *Polar Biol.* DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00238928>
- VILLAFANE VE, HELBLING EW, HOLM-HANSEN W. 1995. Spatial and temporal variability of phytoplankton biomass and taxonomic composition around Elephant Island, Antarctica, during the summers of 1990-1993. *Mar Biol.* 123 (4): 677-686. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00349110>
- WATKINS J, MURRAY A, DALY H. 1999. Variation in the distribution of Antarctic krill *Euphausia superba* around South Georgia. *Mar Ecol Prog Ser.* 188: 149-160. DOI: <https://doi.org/10.3354/meps188149>
- WIEBE P, GREENE C, STANTON T, BURCZYNSKI J. 1990. Sound scattering by live zooplankton and micronekton: empirical studies with a dual-beam acoustical system. *J Acoust Soc Am.* 88 (5): 2346-2360.
- ZHOU M, DORLAND R. 2004. Aggregation and vertical migration behavior of *Euphausia superba*. *Deep-Sea Res (II Top Stud Oceanogr).* 51 (17-19): 2119-2137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.07.009>

