



ARTÍCULO / ARTICLE

Intercalibración de ecosondas científicas (EK60 y EK80) para la evaluación acústica multiplataforma de anchoveta en Chile

Intercalibration of scientific echosounders (EK60 and EK80) for the multiplatform acoustic assessment of anchoveta in Chile

Luis La Cruz

0000-0002-2208-4538
luis.lacruz@ifop.cl

Javier Legua

0000-0001-6539-6745
javier.legua@ifop.cl

Francisco Leiva-Dietz

0000-0003-4304-6247
francisco.leiva@ifop.cl

1. Instituto de Fomento Pesquero (IFOP), Valparaíso, Chile.

*Autor de correspondencia/Corresponding Author: luis.lacruz@ifop.cl

Recibido / Received: 21/10/2024

Aceptado / Accepted: 31/07/2025

Citación / Citation: La Cruz, L.; Legua, J.; Leiva-Dietz, F. 2026. Intercalibración de ecosondas científicas (EK60 y EK80) para la evaluación acústica multiplataforma de anchoveta en Chile, Perú. Bol. Invest. Mar. Cost., 55(1): 108-131

RESUMEN

Los cruceros hidroacústicos son claves para evaluar especies pelágicas como la anchoveta (*Engraulis ringens*) en el Sistema de la Corriente de Humboldt (SCH), una de las pesquerías más importantes de Chile. Las variaciones oceanográficas afectan las condiciones ambientales y la distribución del recurso, especialmente cerca de la costa. Existe una brecha en la cobertura acústica en zonas costeras debido a limitaciones operativas del buque de investigación, lo que restringe la representatividad espacial de las evaluaciones hidroacústicas recurrentes. Para mejorar la cobertura en estas áreas, se han incorporado embarcaciones artesanales con ecosondas EK80, que pueden operar donde el buque principal tiene menor acceso. Este estudio evaluó la comparabilidad y precisión de mediciones acústicas obtenidas con ecosondas EK80 en embarcaciones artesanales cerqueras y con una ecosonda EK60 a bordo del buque de investigación Abate Molina, durante evaluaciones hidroacústicas realizadas entre 2022 y 2024. Se aplicaron modelos de Mínimos Cuadrados Generalizados para analizar la energía retrodispersada (NASC, 38 kHz), y se estimaron cocientes medios de densidades acústicas (R_i) como factores de intercalibración para corregir diferencias sistemáticas. Los resultados evidenciaron una alta correspondencia entre las mediciones, con diferencias en biomasa ajustadas inferiores a 5,5 % y sin cambios significativos en los coeficientes de variación, lo que confirma la robustez del procedimiento. Estos hallazgos respaldan el uso conjunto de multiplataformas para fortalecer la gestión sostenible de la pesca de anchoveta.

PALABRAS CLAVE: Pesquerías, anchoveta, ecosondas, serie temporal, biomasa.

ABSTRACT

Hydroacoustic surveys are key for assessing pelagic species such as the Peruvian anchoveta (*Engraulis ringens*) in the Humboldt Current System (HCS), one of Chile's most important fisheries. Oceanographic variability influences environmental conditions and resource distribution, particularly in coastal areas. However, a coverage gap persists in nearshore zones due to operational limitations of the research vessel, which restricts the spatial representativeness of routine hydroacoustic assessments. To address this gap, artisanal purse-seine vessels equipped with EK80 echosounders have been incorporated, allowing operations in areas less accessible to the main research vessel. This study evaluated the comparability and accuracy of acoustic measurements collected with EK80 echosounders on artisanal vessels against those obtained with an EK60 echosounder aboard the research vessel Abate Molina, during hydroacoustic surveys conducted between 2022 and 2024. Generalized Least Squares (GLS) models were applied to analyze backscattered energy (NASC, 38 kHz), and mean density ratios (R_i) were estimated as intercalibration factors to correct for systematic differences. Results revealed a high correspondence between platforms, with adjusted biomass differences below 5.5% and no significant changes in coefficients of variation, confirming the robustness of the procedure. These findings support the complementary use of multiplatform acoustic surveys as a robust approach to enhance spatial representativeness in stock assessments and strengthen the sustainable management of the anchoveta fishery in the HCS.

KEY WORDS: Fisheries, Peruvian anchoveta, echosounders, temporal series, biomass.



INTRODUCCIÓN

Los cruceros hidroacústicos desempeñan un papel fundamental en la evaluación de especies pelágicas, como la anchoveta peruana *Engraulis ringens* Jenyns 1942 (Hilborn, 2003; Robotham *et al.*, 2010) en el Sistema de la Corriente de Humboldt (SCH) (Ganias, 2014). Esta especie es clave en una de las pesquerías más productivas del mundo, cuya distribución abarca áreas de surgencia costera a lo largo de un extenso rango latitudinal, desde el norte de Perú (04°S) hasta el sur de Chile (42°S) (Alheit y Ñiquen, 2004; Ganias, 2014). En los últimos años, la producción pesquera de anchoveta alcanzó 4.9 millones de toneladas (FAO, 2024); sin embargo, esta población se ve influenciada por fenómenos como El Niño y otras variaciones en las condiciones oceanográficas (FAO, 2024). En el SCH, frente a las costas del norte de Chile, la anchoveta constituye el principal recurso pesquero para la flota industrial cerquera, representando aproximadamente 80% de los desembarques anuales (Armas *et al.*, 2024). A lo largo de las costas de Chile, a nivel administrativo, existen tres unidades de pesquería de anchoveta: la Unidad de Pesquería Norte (Regiones de Arica y Parinacota a Antofagasta), la Unidad de Pesquería Centro Norte (Regiones de Atacama a Coquimbo) y la Unidad de Pesquería Centro Sur (Regiones de Valparaíso a Los Lagos) (Garcés *et al.*, 2019). Estas unidades reflejan diferencias en la dinámica poblacional, presión pesquera y estrategias de manejo, y constituyen un marco relevante para el diseño de estrategias de monitoreo y evaluación acústica en distintas regiones del país. La evaluación de este recurso se realiza mediante cruceros científicos liderados por el buque de investigación (BI) Abate Molina, en operación continua desde 1991, lo que ha permitido generar una serie temporal de largo plazo para el monitoreo del estado del stock. Este buque cuenta con una ecosonda EK60 y una red de arrastre pelágica de media agua (modelo Engel) (IFOP, 2025). Estos cruceros han permitido realizar estimaciones de biomasa en áreas amplias, donde la abundancia de la anchoveta está influenciada por factores ambientales como la temperatura superficial del mar (TSM) y clorofila-a (Chl-a) (Cerna *et al.*, 2022). Diversos estudios han demostrado que un aumento en la TSM y una disminución en la Chl-a pueden resultar en una reducción de las poblaciones de anchoveta, debido a cambios en la productividad primaria y la disponibilidad de hábitat adecuado (Alheit y Ñiquen, 2004; Bertrand *et al.*, 2004; Ñiquen y Bouchon, 2004; Silva *et al.*, 2016; Canales *et al.*, 2018; Hernández-Santoro *et al.*, 2019; Ortiz, 2020). Armas *et al.* (2024) registraron que durante eventos de La Niña (2007, 2013) la

INTRODUCTION

Hydroacoustic cruises play a fundamental role in the assessment of pelagic species, such as the Peruvian anchoveta *Engraulis ringens* Jenyns, 1942 (Hilborn, 2003; Robotham *et al.*, 2010), in the Humboldt Current System (HCS) (Ganias, 2014). This species is key in one of the most productive fisheries in the world, whose distribution covers coastal upwelling areas along an extensive latitudinal range, from northern Peru (04°S) to southern Chile (42°S) (Alheit and Ñiquen, 2004; Ganias, 2014). In recent years, the Peruvian anchoveta fishery production reached 4.9 million tons (FAO, 2024); however, this population is influenced by phenomena such as El Niño and other variations in oceanographic (FAO, 2024) conditions. In the HCS, off the northern coast of Chile, Peruvian anchoveta is the main fishing resource for the industrial purse seine fleet, accounting for approximately 80% of the annual landings (Armas *et al.*, 2024). Administratively, along the coasts of Chile, there are three Peruvian anchoveta fishery units: the Northern Fishery Unit (Regions of Arica and Parinacota to Antofagasta), the Central-Northern Fishery Unit (Regions of Atacama to Coquimbo), and the Central-Southern Fishery Unit (Regions of Valparaíso to Los Lagos) (Garcés *et al.*, 2019). These units reflect differences in population dynamics, fishing pressure, and management strategies, and constitute a relevant framework for the design of monitoring and acoustic evaluation strategies in different areas of the country. The evaluation of this resource is carried out through scientific cruises led by the research vessel (RV) Abate Molina, in continuous operation since 1991, which has allowed for the generation of a long-term time series for monitoring the state of the stock. This vessel is equipped with an EK60 echo sounder and a midwater pelagic trawl net (Engel model) (IFOP, 2025). These cruises have allowed for biomass estimates in large areas, where the abundance of Peruvian anchoveta is influenced by environmental factors such as sea surface temperature (SST) and chlorophyll-a (Chl-a) (Cerna *et al.*, 2022). Various studies have shown that an increase in SST and a decrease in Chl-a can result in a reduction of Peruvian anchoveta populations, due to changes in primary productivity and the availability of suitable habitat (Alheit and Ñiquen, 2004; Bertrand *et al.*, 2004; Ñiquen and Bouchon, 2004; Silva *et al.*, 2016; Canales *et al.*, 2018; Hernández-Santoro *et al.*, 2019; Ortiz, 2020). Armas *et al.* (2024) reported that during La Niña events (2007, 2013) the Peruvian anchoveta moved westward; whereas, in El Niño 2015 its distribution was restricted to a narrow coastal strip (10 nmi). The exception was La Niña 2020, when the highest

anchoveta se desplazó hacia el occidente; mientras que en El Niño 2015 su distribución se restringió a una estrecha franja costera (10 mn). La excepción fue La Niña 2020, cuando las mayores probabilidades de captura se concentraron nuevamente cerca de la costa, debido a condiciones oceanográficas desfavorables. De forma similar, frente a Perú se observó una fuerte respuesta de la anchoveta ante condiciones cálidas y anóxicas (P. Castillo *et al.*, 2025), lo que también favoreció su concentración en zonas someras. En respuesta a estas fluctuaciones, se han venido incorporando diversas embarcaciones artesanales cerqueras (EACs), equipadas con una ecosonda portátil EK80 Simrad, para evaluar la biomasa en áreas cercanas a la costa, principalmente dentro de las 5 millas náuticas (Ñiquen y Bouchon, 2004; Canales *et al.*, 2018; Hernández-Santoro *et al.*, 2019; P. Castillo *et al.*, 2022, 2025).

La ecosonda científica EK60 Simrad (Simrad Kongsberg Maritime AS, Horten, Noruega), disponible comercialmente desde 2001, ha sido utilizada durante décadas en cruceros de evaluación hidroacústica de recursos pelágicos (Andersen, 2001). En 2016, se incorporó el modelo EK80, el cual puede configurarse para funcionar de manera similar a la EK60, garantizando la consistencia en las estimaciones de abundancia a lo largo del tiempo (Macaulay *et al.*, 2018; De Robertis *et al.*, 2019). Estas ecosondas calibradas permiten medir la reflectividad de cardúmenes, generando indicadores de biomasa (Simmonds y MacLennan, 2005; Demer *et al.*, 2015). Los cruceros hidroacústicos de evaluación del reclutamiento de la anchoveta en Chile deben realizarse en períodos cortos, cubriendo toda el área de distribución de la especie objetivo. En estos estudios, la participación de múltiples embarcaciones resulta esencial, ya que cada una contribuye a la evaluación de diferentes sectores del stock. Esto exige comparar y evaluar los datos acústicos generados por cada plataforma (Simmonds y MacLennan, 2005), con el objetivo de reducir la variabilidad espacial y temporal en la estimación del stock (Simmonds *et al.*, 1998). En ese contexto, es necesario determinar si las densidades acústicas de los cardúmenes de anchoveta, registradas tanto con el buque principal (equipado con ecosonda EK60) como por embarcaciones artesanales (equipadas con ecosonda EK80), son consistentes y pueden integrarse sin introducir sesgos significativos en las estimaciones de biomasa y abundancia de la población. La precisión y confiabilidad de los datos acústicos son factores claves para la gestión pesquera,

probabilities of capture were once again concentrated near the coast, due to unfavorable oceanographic conditions. Similarly, off the coast of Peru, a strong response of the Peruvian anchoveta was observed under warm and anoxic conditions (P. Castillo *et al.*, 2025), which also favored its concentration in shallow areas. In response to these fluctuations, various artisanal purse-seine vessels (EACs) have been incorporated, equipped with a portable Simrad EK80 echo sounder, to assess biomass in areas close to the coast, mainly within 5 nautical miles (Ñiquen and Bouchon, 2004; Canales *et al.*, 2018; Hernández-Santoro *et al.*, 2019; P. Castillo *et al.*, 2022; P. Castillo *et al.*, 2025).

The Simrad EK60 scientific echosounder (Simrad Kongsberg Maritime AS, Horten, Norway), commercially available since 2001, has been used for decades in hydroacoustic assessment cruises of pelagic resources (Andersen, 2001). In 2016, the EK80 model was introduced, which can be configured to operate similarly to the EK60, ensuring consistency in abundance estimates over time (Macaulay *et al.*, 2018; De Robertis *et al.*, 2019). These calibrated echo sounders allow for the measurement of the reflectivity of fish schools, generating biomass indicators (Simmonds and MacLennan, 2005; Demer *et al.*, 2015). The hydroacoustic assessment cruises for Peruvian anchoveta recruitment in Chile must be conducted in short periods, covering the entire distribution area of the target species. In these studies, the participation of multiple vessels is essential, as each one contributes to the evaluation of different areas of the stock. This requires comparing and evaluating the acoustic data generated by each platform (Simmonds and MacLennan, 2005), with the aim of reducing spatial and temporal variability in stock estimation (Simmonds *et al.*, 1998). In this context, it is necessary to determine whether the acoustic densities of Peruvian anchoveta schools, recorded both with the main vessel (equipped with an EK60 echo sounder) and by artisanal boats (equipped with an EK80 echo sounder), are consistent and can be integrated without introducing significant biases in the estimates of biomass and population abundance. The precision and reliability of acoustic data is a key factor for fisheries management, as these measurements form the basis for estimating fish abundance indices (MacLennan, 1990; Koslow, 2009).

This study is based on the hypothesis that the distribution and behavior of Peruvian anchoveta are not significantly altered by the differences between observation platforms (research vessel and artisanal purse-seine boats), nor by the technological differences

ya que estas mediciones constituyen la base para la estimación de índices de abundancia de peces (MacLennan, 1990; Koslow, 2009).

Este estudio parte de la hipótesis de que la distribución y el comportamiento de la anchoveta no se ven significativamente alterados por las diferencias entre las plataformas de observación (buque de investigación y embarcaciones artesanales cerqueras), ni por las diferencias tecnológicas entre sus ecosondas (EK60 y EK80). Si esta hipótesis se valida, los datos acústicos generados por ambas plataformas podrían integrarse de manera robusta, permitiendo una estimación conjunta más precisa y eficiente de la abundancia.

La integración de estos datos contribuiría a optimizar las estrategias de monitoreo y manejo pesquero, permitiendo adaptar los diseños de muestreo en los cruceros hidroacústicos y extender la cobertura hacia zonas más costeras, con implicancias clave en la evaluación del recurso. El objetivo de este estudio es evaluar las mediciones acústicas obtenidas mediante ecosondas científicas, a través de un análisis de intercalibración entre el buque principal (BI Abate Molina), equipado con una ecosonda EK60, y embarcaciones artesanales cerqueras (EACs), equipadas con ecosondas EK80. Asimismo, se busca determinar el efecto de los ajustes por intercalibración sobre las estimaciones de biomasa, con el fin de validar el uso conjunto de múltiples plataformas de investigación en cruceros de evaluación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en las costas de Chile frente a las regiones de Arica y Parinacota-Antofagasta y Atacama-Coquimbo, a bordo del buque de investigación (BI) Abate Molina (AM) y diversas embarcaciones artesanales cerqueras (EACs). Las intercalibraciones se realizaron durante cuatro cruceros de evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta, llevados a cabo entre 2022 y 2024 en las Unidades de Pesquería Norte (18° 25' S – 24° 30' S) y Centro Norte (25° 00' S – 32° 10' S) (Figura 1; Tabla S1, Material Suplementario).

between their echo sounders (EK60 and EK80). If this hypothesis is validated, the acoustic data generated by both platforms could be robustly integrated, allowing for a more precise and efficient joint estimation of abundance.

The integration of these data would contribute to optimizing monitoring and fisheries management strategies, allowing for the adaptation of sampling designs in hydroacoustic surveys and extending coverage towards more coastal areas, with key implications for resource assessment. The objective of this study is to evaluate the acoustic measurements obtained with scientific echosounders through an intercalibration analysis between the main vessel (RV Abate Molina), equipped with an EK60 echosounder, and artisanal purse-seine vessels (EACs), equipped with EK80 echosounders. Likewise, the aim is to determine the effect of intercalibration adjustments on biomass estimates, in order to validate the joint use of multiple research platforms in assessment cruises.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The present study was conducted off the coast of Chile in the regions of Arica and Parinacota-Antofagasta and Atacama-Coquimbo, aboard the research vessel (RV) Abate Molina (AM) and various artisanal purse-seine boats (EACs). The intercalibrations were conducted during four hydroacoustic assessment cruises for Peruvian anchoveta recruitment, carried out between 2022 and 2024 in the Northern Fishery Units (18° 25' S – 24° 30' S) and Central Northern (25° 00' S – 32° 10' S) (Figure 1; Table S1, Supplementary Material).

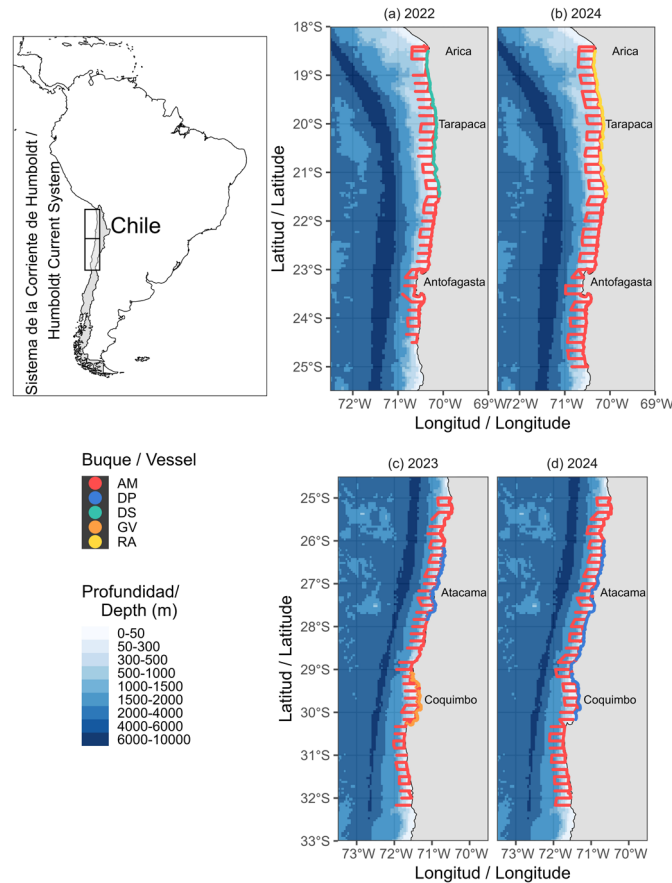


Figura 1. Área de estudio para las comparaciones acústicas entre el BI Abate Molina (AM), equipado con una ecosonda EK60 (frecuencia principal: 38 kHz), y las embarcaciones artesanales cerqueras (EACs: Don Pancracio (DP), Don Sergio (DS), Garota V (GV) y Ragnar (RA)), equipadas con ecosondas EK80 operando también a 38 kHz. (a) área de estudio correspondiente al crucero 2022 AM-DS (*Don Sergio*), (b) área de estudio correspondiente al crucero 2024 AM-RA (*Ragnar*), (c) área de estudio correspondiente al crucero 2023 AM-DP (*Don Pancracio*) y AM-GV (*Garota V*), (d) área de estudio correspondiente al crucero 2024 AM-DP (*Don Pancracio*).

La ecosonda científica EK60 del BI Abate Molina fue configurada para realizar muestreos acústicos con una tasa de sondeo máxima a una frecuencia de 38 kHz, en modo de onda continua, con una duración de pulso de 1.024 ms y potencia de 2000 w. Las ecosondas EK80 instaladas en las EACs se configuraron con los mismos parámetros para asegurar la comparabilidad (Tabla 1). La ecosonda del BI Abate Molina fue calibrada con una esfera estándar de tungsteno (WC/38.1mm con material aglutinante de cobalto 6%) (Foote *et al.*, 1987; Demer *et al.*, 2015), siguiendo el protocolo de Foote *et al.* (1987). La calibración se aplicó al transceptor (*General Purpose Transceiver*, GPT) mediante el software Simrad ER60 v.2.4.3. Los datos se generaron en formato *crudo* (SIMRAD) (Demer *et al.*, 2017) y se almacenaron externamente.

Figure 1. Study area for acoustic comparisons between the RV Abate Molina (AM), equipped with an EK60 echo sounder (main frequency: 38 kHz), and the artisanal purse seine vessels (EACs: Don Pancracio (DP), Don Sergio (DS), Garota V (GV), and Ragnar (RA)) equipped with EK80 echo sounders also operating at 38 kHz. (a) study area corresponding to the 2022 AM-DS (*Don Sergio*) cruise, (b) study area corresponding to the 2024 AM-RA (*Ragnar*) cruise, (c) study area corresponding to the 2023 AM-DP (*Don Pancracio*) and AM-GV (*Garota V*) cruise, (d) study area corresponding to the 2024 AM-DP (*Don Pancracio*) cruise.

The scientific echosounder EK60 of the RV Abate Molina was configured to conduct acoustic sampling with a maximum sounding rate at a frequency of 38 kHz, in continuous wave mode, with a pulse duration of 1.024 ms and a power of 2000 w. The EK80 echo sounders installed in the EACs were configured with the same parameters to ensure comparability (Table 1). The echo sounder of the RV Abate Molina was calibrated with a standard tungsten sphere (WC/38.1 with 6% cobalt binder) (Foote *et al.*, 1987; Demer *et al.*, 2015), following the protocol of Foote *et al.* (1987). The calibration was applied to the transceiver (*General Purpose Transceiver*, GPT) using the Simrad ER60 v.2.4.3 software. The data were generated in *.raw* format (SIMRAD) (Demer *et al.*, 2017) and stored externally.

Tabla 1. Principales características de las EACs (DS: Don Sergio, DP: Don Pancracio, GV: Garota V y RA: Ragnar) y configuración de ecosondas (38 kHz) durante los cruceros 2022-2024.

Año/Year	2022	2023	2023	2024	2024
Código Crucero/ Code Cruise	RECLAN 152-2212	RECLAN 34-2302	RECLAN 34-2302	RECLAN 34-2402	RECLAN 152-2412
Embarcación/ Vessel	DS	DP	GV	DP	RA
Eslora total/ Length Overall (m)	6	14.95	17.43	14.95	11.9
Manga/ Beam (m)	1.8	6.01	7.02	6.01	7.0
Calado Máximo/ Maximum Draft (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Ecosonda/ Echosounder	EK80	EK80	EK80	EK80	EK80
Frecuencia/ Frequency (kHz)	38	38	38	38	38
Transductor/ Transducer	ES38-7C	ES38-7C	ES38-7C	ES38-7C	ES38-7C
Ganancia/ Gain (dB)	26.53	26.53	26.53	26.62	26.73
Ancho de haz de 3 dB a lo largo del barco/ 3 dB beamwidth alongship (°)	6.62	6.62	6.62	6.35	6.37
Ancho de haz de 3 dB transversal al barco/ 3 dB beamwidth athwartship (°)	6.54	6.54	6.54	6.35	6.31
Velocidad del sonido/ Sound speed (ms ⁻¹)	1506.36	1500.83	1500.83	1521.76	1518.09

Table 1. Main characteristics of the EACs (DS: Don Sergio, DP: Don Pancracio, GV: Garota V and RA: Ragnar), and echosounder setting (38 kHz) during the 2022 - 2024 cruises.

Diseño de intercalibraciones acústicas

Las intercalibraciones acústicas se realizaron con una separación de 100 m entre embarcaciones, navegando a ~12 km/h, representativo de la velocidad operativa de las EACs. La EAC mantenía rumbo sur o norte, mientras se coordinaba con el BI Abate Molina vía radio VHF, por sus siglas en inglés Very High Frequency. Cada transecto tuvo una duración de 15 a 30 min, cubriendo condiciones acústicas diversas (Figura 2). La ecosonda EK60 del BI Abate Molina fue tomada como referencia estándar (MacLennan y Pope, 1983). Las condiciones ambientales fueron favorables (viento ≤ 11.1 km/h, altura de ola ≤ 2.3 m), lo que permitió mediciones con mínima perturbación acústica y ambiental.

Acoustic intercalibration design

The acoustic intercalibrations were carried out with a separation of 100 m between vessels, navigating at ~6.5 knots, representative of the operational speed of the EACs. The EAC maintained a south or north course while coordinating with the RV Abate Molina via VHF radio, which stands for Very High Frequency. Each transect lasted from 15 to 30 minutes, covering diverse acoustic conditions (Figure 2). The EK60 echo sounder of the RV Abate Molina was taken as the standard reference (MacLennan and Pope, 1983). The environmental conditions were favorable (wind ≤ 6 knots, wave height ≤ 2.3 m), which allowed for measurements with minimal acoustic and environmental disturbance.

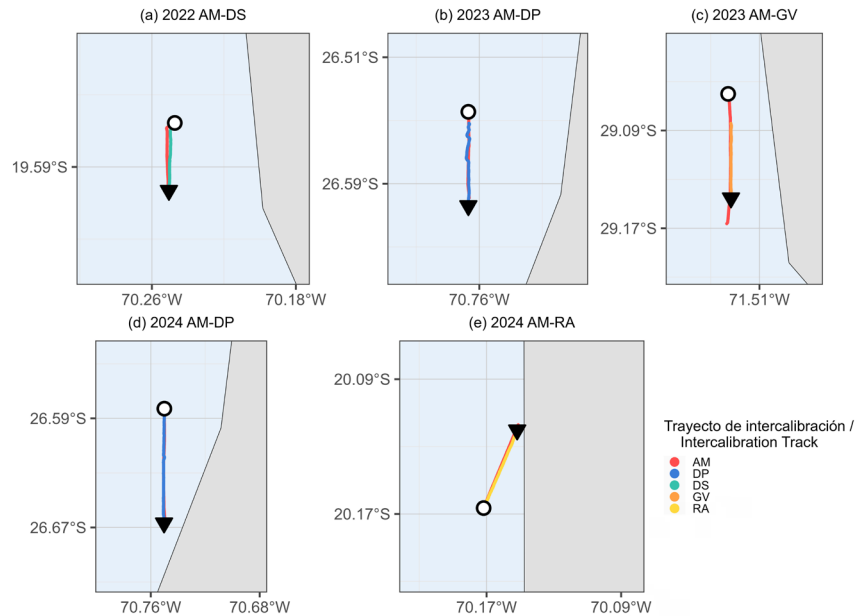


Figura 2. Trayectorias de las intercalibraciones acústicas entre el BI Abate Molina (AM) y las embarcaciones artesanales cerqueras (EACs: DP, DS, GV, RA) durante los cruceros de evaluación hidroacústica de anchoveta entre 2022 y 2024. El círculo marca el punto de partida y la flecha señala la dirección del trayecto de navegación. (a) intercalibración acústica 2022 AM-DS (Don Sergio), (b) intercalibración acústica 2023 AM-DP (Don Pancracio), (c) intercalibración acústica 2023 AM-GV (Garota V), (d) intercalibración acústica 2024 AM-DP (Don Pancracio), (e) intercalibración acústica 2024 AM-RA (Ragnar).

Figure 2. Trajectories of acoustic intercalibrations between the RV Abate Molina (AM) and the artisanal purse-seine vessels (EACs: DP, DS, GV, RA) during the hydroacoustic assessment cruises of Peruvian anchovy between 2022 and 2024. The circle marks the starting point and the arrow indicates the direction of the navigation route. (a) acoustic intercalibration 2022 AM-DS (Don Sergio), (b) acoustic intercalibration 2023 AM-DP (Don Pancracio), (c) acoustic intercalibration 2023 AM-GV (Garota V), (d) acoustic intercalibration 2024 AM-DP (Don Pancracio), (e) acoustic intercalibration 2024 AM-RA (Ragnar).

Procesamiento de datos y análisis

Se utilizó el software ESP3 versión 1.52.0 (Ladroit *et al.*, 2020) (ESP3 / Wiki / ESP3 (sourceforge.net)) para explorar, analizar y exportar los datos acústicos. Los ecogramas fueron sincronizados y segmentados en capas horizontales de 100 pings y tramos verticales de 5 m. Se identificaron concentraciones de macrozooplancton, peces y fondo para análisis comparativo entre plataformas con el objetivo de analizar distintos niveles de intensidad de señal (Zhu *et al.*, 2024). Esta estrategia permitió evaluar de manera más robusta la funcionalidad, sensibilidad y capacidad de detección de las EACs.

Modelo de Mínimos Cuadrados Generalizados (GLS)

Para evaluar cuantitativamente la relación entre mediciones de las EACs y el BI, se aplicó un modelo de Mínimos Cuadrados Generalizados (Generalized Least Squares, GLS, por sus siglas en inglés) que incorpora autocorrelación espacial con estructura exponencial (corExp), considerando la variable posición como proxy de dependencia. La formulación fue:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i$$

Data processing and analysis

ESP3 software version 1.52.0 (Ladroit *et al.*, 2020) (ESP3 / Wiki / ESP3 (sourceforge.net)) was used to explore, analyze, and export the acoustic data. The echograms were synchronized and segmented into horizontal layers of 100 pings and vertical sections of five meters. Concentrations of macrozooplankton, fish, and seabed were identified for comparative analysis between platforms with the aim of analyzing different levels of signal intensity (Zhu *et al.*, 2024). This strategy allowed for a more robust evaluation of the functionality, sensitivity, and detection capability of the EACs.

Generalized Least Squares (GLS) model

To quantitatively evaluate the relationship between EAC measurements and RV, a Generalized Least Squares (GLS) model was applied, incorporating spatial autocorrelation with an exponential structure (corExp), considering the position variable as a proxy for dependency. The formulation was:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i$$

Donde $y_i y_i$ representa la densidad acústica observada por el BI Abate Molina, $x_i x_i$ es la densidad observada por una EAC y β_0 y β_1 corresponden al intercepto y la pendiente del modelo, respectivamente. Este enfoque es más robusto que la regresión lineal simple al considerar dependencia espacial/temporal, y ha sido ampliamente aplicado en estudios comparativos de plataformas de investigación (Foote *et al.*, 1987; Simmonds *et al.*, 1998; Simmonds y MacLennan, 2005; Massé *et al.*, 2018). Los modelos fueron ajustados en R usando la función `gls()` del paquete `nlme` (Pinheiro y Bates, 2000; R Core Team, 2024), y los resultados fueron resumidos utilizando el paquete `modelsummary` (Arel-Bundock, 2022).

Análisis de razón y factor de intercalibración

Se aplicó un enfoque complementario basado en la razón entre valores de NASC (Nautical Area Scattering Coefficient o Coeficiente Náutico de Dispersión Acústica, $m^2 mn^{-2}$) (MacLennan *et al.*, 2002)), registrados por las ecosondas del BIAM y las EACs. A partir de estos valores, se calculó el cociente individual:

$$R_i = \frac{NASC_{AM}}{NASC_{EAC}}$$

El factor de intercalibración F_{int} fue definido como la mediana de los R_i , una medida robusta ante valores atípicos (Massé *et al.*, 2018). La mediana de la desviación absoluta (MDA_{int}) y el coeficiente de variación (CV) se calcularon como:

$$MDA_{int} = [\text{Mediana} (|R_i - F_{int}|)] * 1.4826$$

$$CV = \frac{MDA_{int}}{F_{int}}$$

Donde el factor 1.4826 ajusta la MDA para que sea comparable a la desviación estándar bajo una distribución normal (Adekeye, 2013). Se clasificó la calidad de la concordancia en cuatro categorías según el CV: muy alta concordancia para valores inferiores a 5%, alta concordancia para valores entre 5% y 10%, moderada concordancia para valores entre 10% y 20% y baja concordancia para valores superiores a 20%.

Estimación de biomasa y ajuste por intercalibraciones

A partir de los datos acústicos se estimó la densidad (Sv, por sus siglas en inglés: *Volume backscattering strength*, dB re $1 m^{-1}$; (MacLennan *et al.*, 2002) y posteriormente el NASC. Para convertir a densidad de peces, se aplicó la ecuación de la relación TS-Longitud de J. Castillo *et al.* (2022):

Where $y_i y_i$ represents the acoustic density observed by the RV Abate Molina, $x_i x_i$ is the density observed by an EAC, and β_0 and β_1 correspond to the intercept and the slope of the model, respectively. This approach is more robust than simple linear regression by considering spatial/temporal dependence, and it has been widely applied in comparative studies of research platforms (Foote *et al.*, 1987; Simmonds *et al.*, 1998; Simmonds and MacLennan, 2005; Massé *et al.*, 2018). The models were fitted in R using the `gls()` function from the `nlme` package (Pinheiro and Bates, 2000; R Core Team, 2024), and the results were summarized using the `modelsummary` package (Arel-Bundock, 2022).

Analysis of ratio and intercalibration factor

A complementary approach was applied based on the ratio between NASC values (Nautical Area Scattering Coefficient, $m^2 nm^{-2}$; (MacLennan *et al.*, 2002)) recorded by the RV AM echo sounders and the EACs. From these values, the individual quotient was calculated:

$$R_i = \frac{NASC_{AM}}{NASC_{EAC}}$$

The intercalibration factor F_{int} was defined as the median of the R_i , a robust measure against outliers (Massé *et al.*, 2018). The median of the absolute deviation (MDA_{int}) and the coefficient of variation (CV) were calculated as:

$$MDA_{int} = [\text{Median} (|R_i - F_{int}|)] * 1.4826$$

$$CV = \frac{MDA_{int}}{F_{int}}$$

Where the factor 1.4826 adjusts the MDA to make it comparable to the standard deviation under a normal distribution (Adekeye, 2013). The quality of the agreement was classified into four categories according to the CV: very high agreement for values below 5%, high agreement for values between 5% and 10%, moderate agreement for values between 10% and 20%, and low agreement for values above 20%.

Estimation of biomass and adjustment for intercalibrations

Based on the acoustic data, the density (Sv: Volume backscattering strength, dB re $1 m^{-1}$; (MacLennan *et al.*, 2002) was estimated, and subsequently the NASC. To convert to fish density, the equation of the TS-Length relationship was applied J. Castillo *et al.* (2022):

$$TS = 18.134 * \log_{10}(L, cm) - 71.352$$

La densidad de peces se estimó como:

$$Densidad\ de\ peces\ (ind/mn^2) = \frac{\overline{NASC}}{4\pi 10^{TS/10}}$$

La biomasa total (en toneladas) se calculó multiplicando por el área de distribución y el peso promedio individual estimado a partir de los lances de pesca del BI Abate Molina. La incertidumbre fue estimada mediante *bootstrap* (Robotham y Castillo, 1990). Los valores de NASC de las EACs fueron luego corregidos aplicando el factor F_{int} , y con estos se recalculó la biomasa ajustada y su CV, estimando también el porcentaje de variación respecto al valor original. Todos los análisis estadísticos se realizaron con R (R Core Team, 2024).

RESULTADOS

Precisión de la ecosonda científica EK60 calibrada con una esfera estándar

En este estudio, las velocidades del sonido de las calibraciones del BI Abate Molina fueron entre 1499.15 y 1509.70 ms^{-1} , calculada a partir de la temperatura y salinidad del agua durante el 2022-2024 (Tabla 2). Los TS máximos observados de la esfera de calibración fueron de -41.62, -41.92 y -42.52 dB, medidas a una profundidad de ~15.3 m. Utilizando la calculadora de la Fuerza de Blanco estándar de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), el TS teórico de la esfera de calibración de tungsteno para 38 kHz, calculado a partir de la temperatura y salinidad del agua medidas en el estudio fue de -42.40 dB. Por lo tanto, la diferencia entre los valores medidos y teóricos fueron menores a 1 dB. Los valores obtenidos fueron consistentes con una desviación cuadrática media (RMS, *Root Mean Square* expresado en dB), entre el modelo del haz acústico ajustado y el teórico, inferior al valor máximo recomendado por el fabricante (RMS <0.4 dB), que se traduce en resultados aceptables (Tabla 2).

$$TS = 18.134 * \log_{10}(L, cm) - 71.352$$

The fish density was estimated as:

The total biomass (in tons) was calculated by multiplying the distribution area and the average individual weight estimated from the fishing hauls of the RV Abate Molina. The uncertainty was estimated using *bootstrap* (Robotham and Castillo, 1990). The NASC values of the EACs were then corrected by applying the F_{int} factor, and with these, the adjusted biomass and its CV were recalculated, also estimating the percentage of variation with respect to the original value. All statistical analyses were performed with R (R Core Team, 2024).

RESULTS

Precision of the EK60 scientific echosounder calibrated with a standard sphere

In this study, the sound speeds of the RV Abate Molina calibrations ranged between 1499.15 and 1509.70 ms^{-1} , calculated from the temperature and salinity of the water during 2022-2024 (Table 2). The maximum TS observed from the calibration sphere were -41.62, -41.92, and -42.52 dB, measured at a depth of ~15.3 m. Using the standard Target Strength calculator of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), the theoretical TS of the tungsten calibration sphere for 38 kHz, calculated from the temperature and salinity of the water measured in the study, was -42.40 dB. Therefore, the difference between the measured and theoretical values was less than 1 dB. The values obtained were consistent with a root mean square deviation (RMS, expressed in dB), between the adjusted acoustic beam model and the theoretical one, below the maximum value recommended by the manufacturer (RMS <0.4 dB), which translates into acceptable results (Table 2).

Tabla 2. Principales características del BI Abate Molina (AM) y resultados de las calibraciones de la ecosonda EK60 durante los cruceros 2022-2024.

Año/Year	2022	2023	2023	2024
Código Crucero/ Code Cruise	RECLAN 152-2212	RECLAN 34-2302	RECLAN 34-2402	RECLAN 152-2412
Embarcación/ Vessel	AM	AM	AM	AM
Eslora total/ Length Overall (m)	43.62	43.62	43.62	43.62
Manga/ Beam (m)	8.30	8.30	8.30	8.30
Calado Máximo/ Maximum Draft (m)	3.50	3.50	3.50	3.50
Sitio de calibración/ Calibration site	Bahía Valparaíso/ Valparaíso Bay 33° 02'S-71° 37'O / 33° 02'S-71° 37'W			
Ecosonda/ Echosounder	EK60	EK60	EK60	EK60
Frecuencia/ Frequency (kHz)	38	38	38	38
Transductor/ Transducer	ES38B	ES38B	ES38B	ES38B
Longitud de pulso/ Pulse Length (ms)	1.024	1.024	1.024	1.024
Tipo de esfera/ Type of sphere	WC/38.1	WC/38.1	WC/38.1	WC/38.1
TS esfera/ TS sphere (dB)	-42.40	-42.40	-42.40	-42.40
TS estimado máximo/ Maximum estimated TS/	-41.62	-41.62	-41.92	-42.52
Diferencia TS medido máximo y teórico/ Difference between maximum measured TS and theoretical	0.78	0.78	0.48	0.12
Ganancia/ Gain (dB)	26.23	26.23	26.23	26.31
S _a corregido/ S _a correction (dB re 1 m ⁻¹)	-0.57	-0.57	-0.57	-0.61
Ancho de haz de 3 dB a lo largo del barco/ 3 dB beamwidth alongship (°)	6.89	6.95	7.21	6.99
Ancho de haz de 3 dB transversal al barco/ 3 dB beamwidth athwartship (°)	6.91	6.94	7.10	7.15
Temperatura/ Temperature (°C)	12.1	12.1	14.7	12.65
Salinidad/ Salinity	35.2	35.2	34.9	34.9
Velocidad del sonido/ Sound speed (ms ⁻¹)	1504.40	1503.0	1509.70	1499.15
Raíz cuadrada Media/ Root Mean Square (dB)	0.19	0.19	0.14	0.26

Table 2. Main characteristics of the RV Abate Molina (AM) and results of the EK60 echosounder calibrations during the 2022-2024 cruises.

Intercalibración de ecosondas científicas EK60 y EK80

Los ecogramas presentados en la [Figura 3](#) permiten observar visualmente la estructura de las agregaciones detectadas por cada plataforma. En general, los ecogramas estuvieron compuestos por densidades de ecos débiles, mayoritariamente asociadas a capas de macrozooplancton (valores de Sv menores a -60 dB). En la mayoría de los casos, se observa el fondo marino delimitado por una línea continua de color negro, correspondiente a valores de Sv alrededor de -25 dB.

Intercalibration of EK60 and EK80 scientific echosounders

The echograms presented in [Figure 3](#) allow for a visual observation of the structure of the aggregations detected by each platform. In general, the echograms were composed of weak echo densities, mostly associated with macrozooplankton layers (Sv values less than -60 dB). In most cases, the seabed is observed delineated by a continuous black line, corresponding to Sv values around -25 dB.

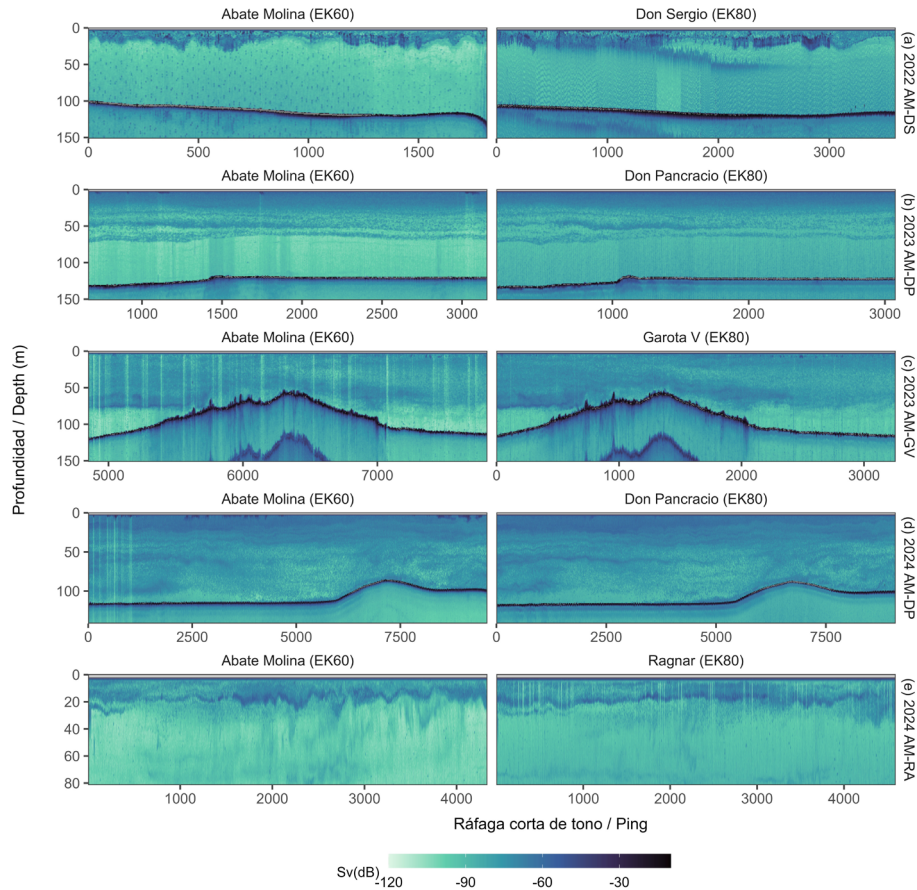


Figura 3. Ecogramas a 38 kHz registrados por el BI Abate Molina (AM), equipado con una ecosonda EK60, y por embarcaciones artesanales cerqueras (EACs: DS, DP, GV, RA) equipadas con ecosondas EK80. (a) intercalibración acústica 2022 AM–DS (Don Sergio), (b) intercalibración acústica 2023 AM–DP (Don Pancracio), (c) intercalibración acústica 2023 AM–GV (Garota V), (d) intercalibración acústica 2024 AM–DP (Don Pancracio), (e) intercalibración acústica 2024 AM–RA (Ragnar).

Figure 3. Echograms at 38 kHz recorded by the RV Abate Molina (AM), equipped with an EK60 echosounder, and by artisanal purse-seine vessels (EACs: DS, DP, GV, RA) equipped with EK80 echosounders. (a) 2022 AM–DS acoustic intercalibration (Don Sergio), (b) 2023 AM–DP acoustic intercalibration (Don Pancracio), (c) 2023 AM–GV acoustic intercalibration (Garota V), (d) 2024 AM–DP acoustic intercalibration (Don Pancracio), (e) 2024 AM–RA acoustic intercalibration (Ragnar).

Para evaluar cuantitativamente esta concordancia, se aplicaron modelos GLS con autocorrelación espacial entre las mediciones acústicas registradas por el AM y las distintas EACs. La **Figura 4** muestra los gráficos de dispersión de las densidades acústicas (NASC, m^2mn^{-2}) observadas por cada EAC frente a las del BI Abate Molina, junto con la línea de ajuste derivada del modelo GLS para cada caso.

To quantitatively evaluate this concordance, GLS models with spatial autocorrelation were applied between the acoustic measurements recorded by the AM and the different EACs. **Figure 4** shows the scatter plots of acoustic densities (NASC, m^2mn^{-2}) observed by each EAC compared to those of the RV Abate Molina, along with the fitted line derived from the GLS model for each case.

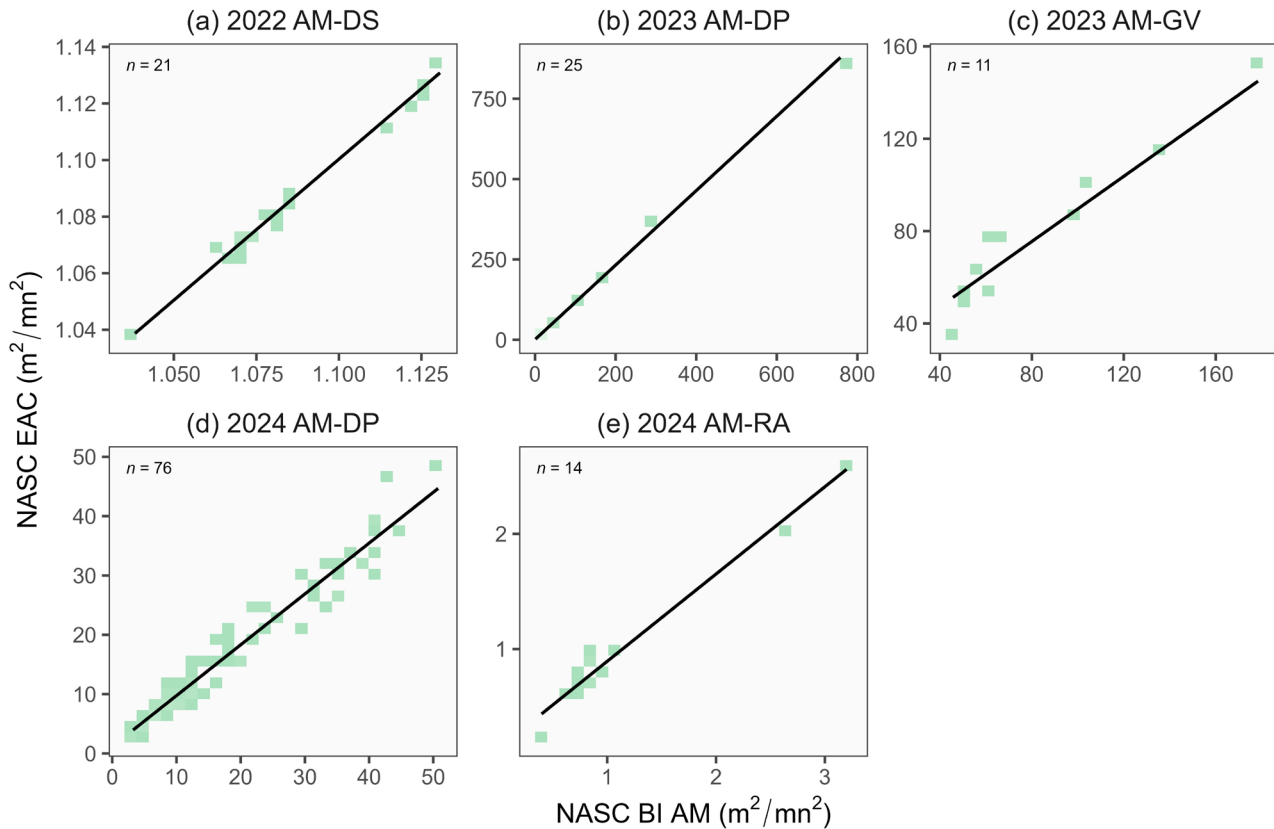


Figura 4. Comparaciones de la ecointegración (m^2mn^{-2}) observada entre el BI Abate Molina (EK60) y las EACs (EK80): dispersión de las densidades acústicas registradas por ambas plataformas, con línea de ajuste obtenida mediante modelo de Mínimos Cuadrados Generalizados (GLS). (a) intercalibración acústica 2022 AM-DS (Don Sergio), (b) intercalibración acústica 2023 AM-DP (Don Pancracio), (c) intercalibración acústica 2023 AM-GV (Garota V), (d) intercalibración acústica 2024 AM-DP (Don Pancracio), (e) intercalibración acústica 2024 AM-RA (Ragnar).

Los modelos ajustados muestran distintos grados de concordancia entre plataformas según el año y la embarcación involucrada (Tabla 3). En el crucero de 2022, la embarcación Don Sergio presentó la mayor correspondencia con el buque de investigación, con una pendiente prácticamente igual a 1 (0.99) y un error residual nulo (RMSE = 0.00), lo que indica una alta precisión y ausencia de sesgo sistemático en las mediciones. En 2023, se observaron diferencias importantes: Don Pancracio mostró una pendiente significativamente mayor a 1 (1.158), indicando una sobreestimación sistemática en la estimación de la EAC, con un error residual moderado (RMSE = 3.64); mientras que Garota V presentó una pendiente menor a 1 (0.71) y un intercepto elevado, lo que sugiere una subestimación sistemática y un sesgo adicional, además de una mayor variabilidad no explicada (RMSE = 9.91). Para 2024 Don Pancracio mostró una mejora en la concordancia

Figure 4. Comparisons of the observed eco-integration (m^2nmi^{-2}) between the RV Abate Molina (EK60) and the EACs (EK80): Dispersion of the acoustic densities recorded by both platforms, with a fitted line obtained through the Generalized Least Squares (GLS) model. (a) 2022 AM-DS acoustic intercalibration (Don Sergio), (b) 2023 AM-DP acoustic intercalibration (Don Pancracio), (c) 2023 AM-GV acoustic intercalibration (Garota V), (d) 2024 AM-DP acoustic intercalibration (Don Pancracio), (e) 2024 AM-RA acoustic intercalibration (Ragnar).

The adjusted models show different degrees of agreement between platforms depending on the year and the vessel involved (Table 3). On the 2022 cruise, the vessel Don Sergio showed the greatest correspondence with the research ship, with a slope practically equal to 1 (0.99) and a zero residual error (RMSE = 0.00), indicating high precision and absence of systematic bias in the measurements. In 2023, significant differences were observed: Don Pancracio showed a slope significantly greater than 1 (1.158), indicating a systematic overestimation in the estimation of the EAC, with a moderate residual error (RMSE = 3.64); whereas Garota V presented a slope less than 1 (0.71) and a high intercept, suggesting a systematic underestimation and an additional bias, as well as greater unexplained variability (RMSE = 9.91). By 2024, Don Pancracio showed an improvement in concordance

respecto al año anterior, aunque aún con una pendiente inferior a 1 (0.86) y un error residual más bajo (RMSE = 2.48), indicando una subestimación moderada. Por su parte Ragnar presentó una buena correspondencia con el buque de investigación (pendiente = 0.76) y un error residual muy bajo (RMSE = 0.10), lo que refleja una variabilidad mínima en las mediciones. Los parámetros de autocorrelación espacial (rango) estimados en los modelos variaron entre 0.05 y 1.66, lo que refleja distintos niveles de dependencia espacial entre mediciones consecutivas a lo largo del transecto. Esta estructura de correlación fue clave para mejorar la precisión de las estimaciones en comparación con un modelo lineal simple, al capturar adecuadamente la estructura espacial inherente a los datos acústicos.

compared to the previous year, although still with a slope less than 1 (0.86) and a lower residual error (RMSE = 2.48), indicating a moderate underestimation. For his part, Ragnar showed a good match with the research vessel (slope = 0.76) and a very low residual error (RMSE = 0.10), which reflects minimal variability in the measurements. The spatial autocorrelation parameters (range) estimated in the models varied between 0.05 and 1.66, reflecting different levels of spatial dependence between consecutive measurements along the transect. This correlation structure was key to improving the accuracy of the estimates compared to a simple linear model, by adequately capturing the spatial structure inherent in the acoustic data.

Tabla 3. Resultados del modelo GLS para las intercalibraciones entre el BI Abate Molina (AM) y las EACs en 38 kHz. IC: Intervalo de Confianza, RMSE = Raíz del Error Cuadrático Medio.

Table 3. GLS model results for the intercalibrations between the RV Abate Molina (AM) and the EACs at 38 kHz. CI: Confidence Interval, RMSE = Root Mean Square Error.

Comparación / Comparison	Año / Year	Nº Observ. / Obs.	Intercepto / Intercept	IC95% Intercepto	Pendiente/ Slope	Rango/ Range	IC95% Pendiente	RMSE
AM-Don Sergio	2022	21	0.01	[-0.05, 0.06]	0.99***	0.05	[0.95, 1.05]	0.00
AM-Don Pancracio	2023	25	0.67	[-1.24, 2.58]	1.16***	0.50	[1.15, 1.17]	3.64
AM-Garota V	2023	11	19.04	[-5.12, 43.21]	0.71***	1.63	[0.47, 0.94]	9.91
AM-Don Pancracio	2024	76	1.17	[-0.00, 2.35]	0.86***	0.50	[0.81, 0.91]	2.48
AM-Ragnar	2024	14	0.14	[-0.03, 0.31]	0.76***	1.66	[0.66, 0.85]	0.10
p < 0.1, * p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001								

Con base en la metodología descrita, se optó por aplicar el enfoque de razón con el fin de obtener un factor de intercalibración (F_{int}), que permitiera ajustar los valores registrados por las EACs. Este ajuste fue fundamental para homogeneizar las mediciones acústicas entre plataformas y asegurar una estimación más precisa de la biomasa de anchoveta. Los resultados obtenidos (Tabla 4) evidencian diferentes niveles de concordancia entre las plataformas y los años evaluados. Por ejemplo, se observó muy alta concordancia para Don Sergio (2022) y alta concordancia para Don Pancracio (2023); mientras que en otros casos, como Garota V (2023), Don Pancracio (2024) y Ragnar (2024), la concordancia fue moderada, lo que resalta la importancia de aplicar el factor F_{int} antes del cálculo final de biomasa. Este factor fue posteriormente utilizado para ajustar directamente los datos acústicos de las EACs, permitiendo así integrar de manera coherente su aporte en la estimación global del stock.

Tabla 4. Resultados del análisis de intercalibración basado en la razón de densidades acústicas (R_i/R_j) entre el BI Abate Molina (AM) y las EACs.

Comparación/ Comparison	Año/ Year	F_{int}	MDA_{int}	CV (%)	Calidad/ Quality
AM-Don Sergio	2022	1.02	0.002	0.23	Muy alta concordancia/ Very high agreement
AM-Don Pancracio	2023	1.07	0.09	8.79	Alta concordancia/ High agreement
AM-Garota V	2023	0.91	0.11	11.63	Moderada concordancia/ Moderate agreement
AM-Don Pancracio	2024	0.92	0.16	17.06	Moderada concordancia/ Moderate agreement
AM-Ragnar	2024	0.92	0.15	16.21	Moderada concordancia/ Moderate agreement

Evaluación de la variación en biomasa estimada tras ajustes por intercalibración

Los resultados muestran que el ajuste de los valores NASC mediante factores de intercalibración (F_{int}) entre plataformas no generó diferencias significativas en las estimaciones finales de biomasa de anchoveta, lo que sugiere una alta consistencia entre las mediciones acústicas realizadas desde las embarcaciones artesanales cerqueras (EACs) y el buque de investigación (Tabla 5).

Based on the described methodology, it was decided to apply the ratio approach in order to obtain an intercalibration factor (F_{int}), which would allow for adjusting the values recorded by the EACs. This adjustment was essential to standardize the acoustic measurements between platforms and ensure a more accurate estimation of Peruvian anchoveta biomass. The results obtained (Table 4) show different levels of agreement between the platforms and the years evaluated. For example, very high concordance was observed for Don Sergio (2022) and high concordance for Don Pancracio (2023); whereas, in other cases, such as Garota V (2023), Don Pancracio (2024), and Ragnar (2024), the concordance was moderate, highlighting the importance of applying the F_{int} factor before the final biomass calculation. This factor was subsequently used to directly adjust the acoustic data of the EACs, thus allowing their contribution to be coherently integrated into the global stock estimation.

Table 4. Results of the intercalibration analysis based on the ratio of acoustic densities (R_i/R_j) between the RV Abate Molina (AM) and the EACs.

Evaluation of variation in estimated biomass after intercalibration adjustments

The results show that adjusting the NASC values using intercalibration factors (F_{int}) between platforms did not generate significant differences in the final estimates of Peruvian anchoveta biomass, suggesting a high consistency between the acoustic measurements taken from artisanal purse-seine vessels (EACs) and the research vessel (Table 5).

Tabla 5. Comparación de biomasa estimada de anchoveta con y sin ajuste por intercalibración, considerando talla, peso promedio y plataformas utilizadas por crucero. AM: Abate Molina.

Año/ Year	Cobertura espacial/ Spatial Coverage	Plataformas/ Platforms	Talla Promedio/ Mean Length (cm)	Peso Promedio/ Mean Weight (g)	Biomasa/ Biomass (t)	CV Biomasa/ Biomass	Biomasa Ajustada/ Adjusted Biomass (t)	CV Ajustada/ Adjusted	Variación Biomasa/ Biomass Variation (%)
2022	Arica- Antofagasta	AM - Don Sergio	10.9	9.7	280,043.83	0.11	279,300.40	0.11	-0.27 ↓
2023	Atacama- Coquimbo	AM - Don Pancracio - Garota V	9.1	6.0	270,023.06	0.20	261,934.19	0.21	-3.00 ↓
2024	Atacama- Coquimbo	AM - Don Pancracio	8.9	5.3	32,971.00	0.16	31,278.15	0.16	-5.13 ↓
2024	Arica- Antofagasta	AM - Ragnar	7.60	5.13	245,966.92	0.12	240,006.73	0.12	-2.42 ↓

En los cuatro cruceros analizados en el 2022-2024, las variaciones porcentuales entre la biomasa estimada originalmente y la biomasa ajustada fueron bajas y negativas en todos los casos, con valores de -0.27 % en 2022, -3.00 % en 2023, -5.13 % en 2024 (Don Pancracio) y -2.42 % en 2024 (Ragnar). Estas diferencias se mantuvieron dentro de márgenes aceptables, lo que indica que la aplicación del F_{int} no introdujo sesgos importantes y permitió conservar la robustez de las estimaciones de biomasa.

Asimismo, los coeficientes de variación (CV) de la biomasa ajustada fueron prácticamente iguales a los valores originales, lo que refuerza la fiabilidad del procedimiento de intercalibración aplicado. En consecuencia, la integración de embarcaciones artesanales representa una estrategia viable y técnicamente sólida para fortalecer los programas de evaluación acústica del recurso anchoveta (Figura 5).

Table 5. Comparison of estimated Peruvian anchoveta biomass with and without adjustment for intercalibration, considering size, average weight, and platforms used per cruise. AM: Abate Molina.

In the four cruises analyzed between 2022-2024, the percentage variations between the originally estimated biomass and the adjusted biomass were low and negative in all cases, with values of -0.27% in 2022, -3.00% in 2023, -5.13% in 2024 (Don Pancracio), and -2.42% in 2024 (Ragnar). These differences remained within acceptable margins, indicating that the application of the F_{int} did not introduce significant biases and allowed the robustness of the biomass estimates to be maintained.

Likewise, the coefficients of variation (CV) of the adjusted biomass were practically equal to the original values, which reinforces the reliability of the intercalibration procedure applied. Consequently, the integration of artisanal vessels represents a viable and technically sound strategy to strengthen the acoustic assessment programs for the Peruvian anchoveta resource (Figure 5).

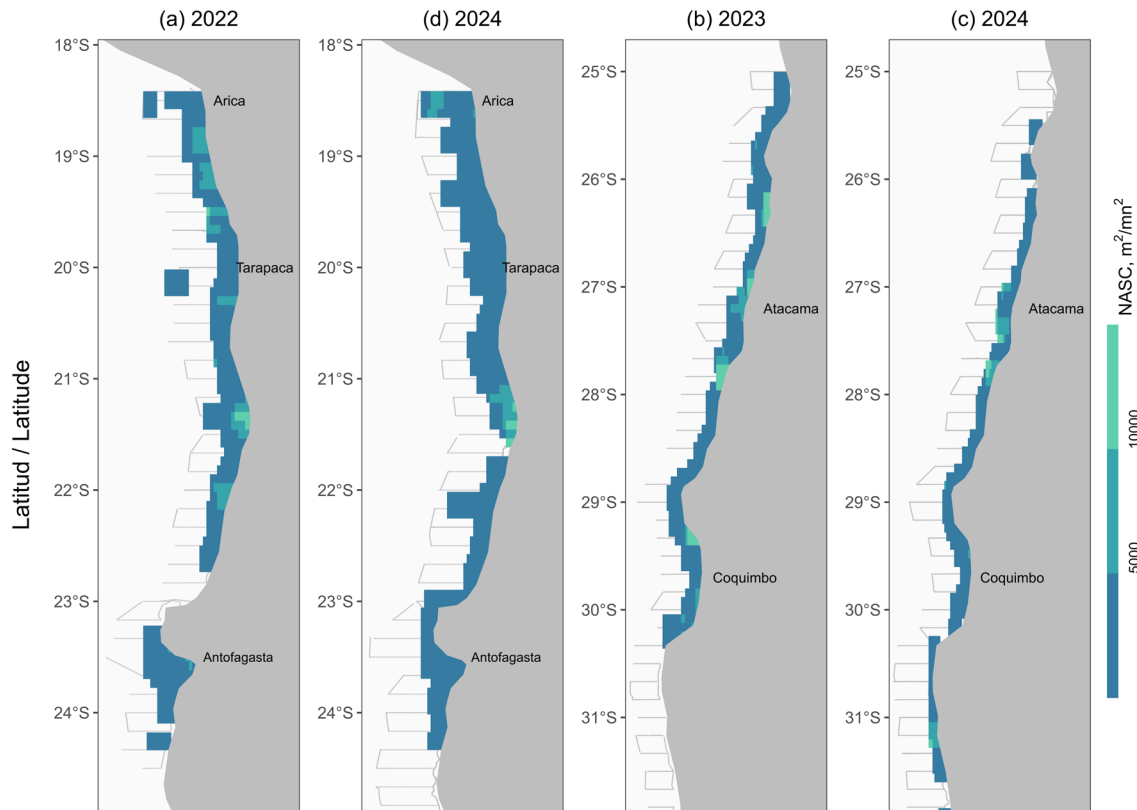


Figura 5. Mapas de la distribución espacial de la biomasa de anchoveta, estimada a partir de valores ajustados del NASC (Coeficiente Náutico de Dispersión Acústica, m^2/mn^2), generados utilizando datos de las embarcaciones artesanales cerqueras (EACs) y del BI *Abate Molina*.

Figure 5. Maps of the spatial distribution of Peruvian anchoveta biomass, estimated from adjusted NASC values (Nautical Area Scattering Coefficient, m^2/mn^2), generated using data from artisanal purse-seine vessels (EACs) and the RV *Abate Molina*.

DISCUSIÓN

Intercalibración entre plataformas de muestreo: una estrategia para ampliar cobertura sin comprometer la calidad

La necesidad de realizar intercalibraciones acústicas entre plataformas ha sido destacada por diversos autores como un elemento esencial para asegurar la consistencia y comparabilidad de los resultados a lo largo del tiempo (Simmonds y MacLennan, 2005). En línea con esta visión, el International Council for the Exploration of the Sea (ICES, 2015; Doray *et al.*, 2021) ha publicado directrices específicas que recomiendan la planificación periódica de ejercicios de intercalibración entre buques y equipos acústicos, con el fin de minimizar posibles sesgos y garantizar la coherencia metodológica en cruceros de evaluación pesquera. En este estudio, se ha abordado la necesidad de intercalibración entre plataformas de muestreo al comparar y ajustar las observaciones obtenidas por embarcaciones artesanales con aquellas generadas por un buque de investigación científica. La

DISCUSSION

Intercalibration between sampling platforms: a strategy to expand coverage without compromising quality

The need to perform acoustic intercalibrations between platforms has been highlighted by various authors as an essential element to ensure the consistency and comparability of results over time (Simmonds and MacLennan, 2005). In line with this vision, the International Council for the Exploration of the Sea (ICES, 2015; Doray *et al.*, 2021) has published specific guidelines recommending the periodic planning of intercalibration exercises between vessels and acoustic equipment, in order to minimize potential biases and ensure methodological consistency in fisheries assessment cruises. In this study, the need for intercalibration between sampling platforms has been addressed when comparing and adjusting observations obtained by artisanal vessels with those generated by a scientific research vessel. The incorporation of portable scientific echosounders

incorporación de ecosondas científicas portátiles EK80 de 38 kHz en embarcaciones artesanales cerqueras (EACs), y su comparación con la ecosonda EK60 instalada en el buque de investigación Abate Molina, ha constituido un componente clave en los cruceros de evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta realizados entre 2022 y 2024 en las Unidades de Pesquería Norte y Centro Norte de Chile. Esta estrategia ha permitido ampliar significativamente la cobertura espacial de los cruceros sin comprometer la calidad de los datos. La intercalibración, en este contexto, asegura que los datos generados por estas plataformas y adaptadas mantengan niveles de precisión y consistencia equivalentes a los obtenidos por el buque de investigación, permitiendo integrar de forma robusta la información recolectada en diferentes sectores del ecosistema.

¿Existen diferencias en el rendimiento de las ecosondas?

Los cruceros hidroacústicos son herramientas clave para estimar la abundancia y biomasa de recursos pesqueros (Simmonds y MacLennan, 2005). Para evaluar el rendimiento de distintas ecosondas, es necesario realizar intercalibraciones entre plataformas de investigación utilizando modelos estadísticos robustos, como los modelos de mínimos cuadrados generalizados (GLS), que permiten capturar la autocorrelación espacial inherente a los datos acústicos.

Los resultados muestran que, pese a diferencias esperables por condiciones operativas o de instalación, las EACs fueron capaces de reproducir consistentemente los patrones de densidad acústica observados por el buque de investigación. Por ejemplo, Don Sergio (2022) presentó una pendiente cercana a 1 (0.99), mientras que otras embarcaciones, como Garota V (2023), mostraron mayores desviaciones, las cuales fueron corregidas mediante la aplicación de factores de intercalibración (F_{int}). Resultados similares fueron registrados por otros autores, con razones de comparación que oscilaron entre 0.99 y 1.15, y pendientes de regresión lineal entre 1.00 y 1.02, lo que refleja una alta consistencia en las mediciones obtenidas entre plataformas distintas (Macaulay *et al.*, 2018; Massé *et al.*, 2018). De forma consistente, otros estudios también han registrado diferencias menores al 10% al comparar ecosondas entre diferentes plataformas. Por ejemplo, se ha observado un alto grado de concordancia entre un vehículo de superficie no tripulado (USV, Unmanned Surface Vehicle) y un buque de investigación (Swart *et al.*, 2016; De Robertis *et al.*, 2019), entre distintos buques (De Robertis y Handegard, 2013), así como entre instrumentos distintos instalados en la misma embarcación (Macaulay *et al.*, 2018). Estos antecedentes respaldan la validez del rango observado en este estudio y refuerzan

EK80 of 38 kHz in artisanal purse-seine vessels (EACs), and their comparison with the EK60 echosounder installed on the research vessel Abate Molina, has been a key component in the hydroacoustic assessment cruises of Peruvian anchoveta recruitment conducted between 2022 and 2024 in the Northern and North-Central Fisheries Units of Chile. This strategy has allowed for a significant expansion of the spatial coverage of the cruises without compromising the quality of the data. Intercalibration, in this context, ensures that the data generated by these platforms and adapted maintain levels of accuracy and consistency equivalent to those obtained by the research vessel, allowing for the robust integration of information collected in different sectors of the ecosystem.

Are there differences in the performance of echo sounders?

Hydroacoustic surveys are key tools for estimating the abundance and biomass of fishery resources (Simmonds and MacLennan, 2005). To evaluate the performance of different echosounders, it is necessary to conduct intercalibrations between research platforms using robust statistical models, such as generalized least squares (GLS) models, which allow capturing the spatial autocorrelation inherent in acoustic data. The results show that, despite expected differences due to operational or installation conditions, the EACs were able to consistently reproduce the acoustic density patterns observed by the research vessel. For example, Don Sergio (2022) presented a slope close to 1 (0.99), while other vessels, such as Garota V (2023), showed greater deviations, which were corrected by applying intercalibration factors (F_{int}). Similar results were reported by other authors, with comparison ratios ranging from 0.99 to 1.15, and linear regression slopes between 1.00 and 1.02, reflecting a high consistency in the measurements obtained across different platforms (Macaulay *et al.*, 2018; Massé *et al.*, 2018). Consistently, other studies have also reported differences of less than 10% when comparing echo sounders across different platforms. For example, a high degree of agreement has been observed between an unmanned surface vehicle (USV) and a research vessel (Swart *et al.*, 2016; De Robertis *et al.*, 2019), between different vessels (De Robertis and Handegard, 2013), as well as between different instruments installed on the same vessel (Macaulay *et al.*, 2018). These background factors support the validity of the range observed in this study and reinforce the applicability of the intercalibration process to maintain the comparability of acoustic measurements. The intercalibration of echo sounders does not aim to calibrate the data itself, but to adjust the measurements from different platforms to make them comparable. In some cases, due

la aplicabilidad del proceso de intercalibración para mantener la comparabilidad de las mediciones acústicas. La intercalibración de ecosondas no busca calibrar los datos en sí, sino ajustar las mediciones de plataformas diferentes para hacerlas comparables. En algunos casos, por condiciones climáticas adversas o restricciones logísticas, no fue posible realizar calibraciones directas en las EACs, lo que refuerza la importancia del proceso de intercalibración posterior (Gutiérrez *et al.*, 2016).

Precisión de las ecosondas EK60 y EK80: posibles sesgos en las comparaciones acústicas

Las diferencias entre los modelos de ecosonda EK60 y EK80 son considerablemente menores que las provenientes de otras fuentes de sesgo en los cruceros acústicos y los procesos de evaluación de stocks (Simmonds y MacLennan, 2005). Por lo tanto, al utilizar las ecosondas EK60 y EK80, con la configuración y procesamiento adecuados de los datos, no se debería introducir un cambio significativo en la estimación de abundancia en una serie temporal de evaluación (Macaulay *et al.*, 2018). En una intercalibración ideal, se espera que ambas ecosondas observen el mismo blanco en condiciones similares. Sin embargo, en la práctica esto raramente ocurre. El sesgo relativo, definido como la diferencia sistemática entre la ecosonda de referencia y la secundaria, puede deberse tanto al equipo como a condiciones operativas, ambientales o biológicas (Chander *et al.*, 2013). Los resultados de este estudio mostraron diferencias inferiores a 1 dB entre el valor de Target Strength (TS) teórico y el valor máximo observado durante las calibraciones con esfera estándar, lo que está dentro del rango aceptable (Demer *et al.*, 2015). Esto indica una buena calibración del equipo principal y, a su vez, proporciona un marco de referencia para evaluar el desempeño relativo de las ecosondas instaladas en embarcaciones artesanales.

Un aspecto relevante es el ángulo de haz equivalente (EBA), especialmente cuando los peces se ubican a mayor profundidad (>80 m), como ocurre ocasionalmente con la anchoveta (Hernández-Santoro *et al.*, 2019; Caballero *et al.*, 2024). En este estudio se consideraron también señales de fondo (100 - 150 m), permitiendo evaluar el efecto del EBA en el rendimiento de las ecosondas. Además, comparaciones entre equipos científicos como el WBAT y el Signature100 han evidenciado diferencias en la detección de agregaciones, atribuibles al tratamiento del ruido y la sensibilidad, destacando la importancia de una evaluación cuidadosa incluso entre instrumentos diseñados para fines

to adverse weather conditions or logistical restrictions, it was not possible to perform direct calibrations at the EACs, which underscores the importance of the subsequent intercalibration process (Gutiérrez *et al.*, 2016).

Precision of EK60 and EK80 echo sounders: possible biases in acoustic comparisons

The differences between the EK60 and EK80 echo sounder models are considerably smaller than those arising from other sources of bias in acoustic surveys and stock assessment processes (Simmonds and MacLennan, 2005). Therefore, when using the EK60 and EK80 echo sounders, with the appropriate configuration and data processing, there should not be a significant change introduced in the abundance estimation in a time series assessment (Macaulay *et al.*, 2018). In an ideal intercalibration, it is expected that both echosounders observe the same target under similar conditions. However, in practice, this rarely happens. Relative bias, defined as the systematic difference between the reference echosounder and the secondary one, can be due to equipment as well as operational, environmental, or biological conditions (Chander *et al.*, 2013). The results of this study showed differences of less than 1 dB between the theoretical Target Strength (TS) value and the maximum value observed during calibrations with a standard sphere, which is within the acceptable range (Demer *et al.*, 2015). This indicates a good calibration of the main equipment and, in turn, provides a reference framework for evaluating the relative performance of the echo sounders installed on artisanal vessels.

A relevant aspect is the equivalent beam angle (EBA), especially when the fish are located at greater depths (>80 m), as occasionally happens with Peruvian anchoveta (Hernández-Santoro *et al.*, 2019; Caballero *et al.*, 2024). In this study, background signals (100–150 m) were also considered, allowing for the evaluation of the effect of EBA on the performance of echo sounders. Moreover, comparisons between scientific equipment such as the WBAT and the Signature100 have shown differences in the detection of aggregations, attributable to noise treatment and sensitivity, highlighting the importance of careful evaluation even among instruments designed for similar purposes (Annasawmy *et al.*, 2024). Regarding the avoidance of sampling volume, although horizontal avoidance has been documented in some pelagic species (e.g., jack mackerel, herring) (De Robertis and Handegard, 2013), in the case of Peruvian anchoveta, studies by Gerlotto *et al.* (2004) suggest that avoidance is predominantly vertical. These findings

similares (Annasawmy *et al.*, 2024). Respecto al evitamiento del volumen de muestreo, si bien se ha documentado evitamiento horizontal en algunas especies pelágicas (p.ej., jurel, arenque) (De Robertis y Handegard, 2013), en el caso de la anchoveta, estudios de Gerlotto *et al.* (2004) sugieren que el evitamiento es predominantemente vertical. Estos hallazgos confirman que, con configuraciones adecuadas, los equipos EK80 instalados en EACs pueden ofrecer niveles de precisión comparables a ecosondas estándar como la EK60.

Intercalibración de plataformas: relevancia y limitaciones

Las embarcaciones pesqueras comerciales han sido reconocidas como plataformas complementarias para la recolección de datos científicos, especialmente en oceanografía y monitoreo pesquero. Su amplia cobertura geográfica y frecuencia de operación permiten acceder a áreas donde los buques científicos tradicionales rara vez operan, mejorando así la representatividad espacial y temporal de los datos obtenidos (Melvin *et al.*, 2016; Gawarkiewicz y Malek Mercer, 2019; Manso-Narvarte *et al.*, 2024). Esta integración ha abierto nuevas oportunidades para aumentar la eficiencia y reducir costos en programas de monitoreo marino a largo plazo.

La razón entre valores NASC registrados por las EACs y el buque principal fue utilizada para derivar factores de intercalibración (F_{int}) que permitieran ajustar las mediciones de las plataformas complementarias. En la mayoría de los casos, el coeficiente de variación (CV) asociado al F_{int} fue bajo (<10%), lo que indica buena concordancia. Sin embargo, embarcaciones como Garota V (2023) o Don Pancracio (2024) mostraron mayor variabilidad, destacando la importancia de aplicar este tipo de correcciones para asegurar la coherencia de las estimaciones globales.

Cabe destacar que los intervalos de comparación fueron relativamente cortos (entre 15 y 30 min), por lo que, si bien los resultados son consistentes, su aplicabilidad a escalas temporales mayores debe ser interpretada con cautela (Carrera, 2015). Se sugiere complementar estas comparaciones con experimentos de mayor duración en futuros estudios. El objetivo central de estas intercalibraciones es garantizar que las diferencias observadas entre plataformas de investigación no generen sesgos en la estimación de la abundancia y biomasa (Simmonds y MacLennan, 2005; ICES, 2015). En este estudio, la aplicación del F_{int} generó ajustes menores en la biomasa estimada (<5.5% en todos los casos), sin cambios significativos en los coeficientes de variación,

confirmar que, con appropriate configurations, EK80 equipment installed in EACs can offer levels of accuracy comparable to standard echo sounders like the EK60.

Intercalibration of platforms: relevance and limitations

Commercial fishing vessels have been recognized as complementary platforms for the collection of scientific data, especially in oceanography and fisheries monitoring. Its wide geographical coverage and frequency of operation allow access to areas where traditional scientific vessels rarely operate, thus improving the spatial and temporal representativeness of the data obtained (Melvin *et al.*, 2016; Gawarkiewicz and Malek Mercer, 2019; Manso-Narvarte *et al.*, 2024). This integration has opened new opportunities to increase efficiency and reduce costs in long-term marine monitoring programs.

The ratio between NASC values recorded by the EACs and the main vessel was used to derive intercalibration factors (F_{int}) that would allow for the adjustment of measurements from the complementary platforms. In most cases, the coefficient of variation (CV) associated with F_{int} was low (<10%), indicating good agreement. However, vessels like Garota V (2023) or Don Pancracio (2024) showed greater variability, highlighting the importance of applying this type of correction to ensure the consistency of global estimates.

It is worth noting that the comparison intervals were relatively short (between 15 and 30 minutes), so while the results are consistent, their applicability to longer time scales should be interpreted with caution (Carrera, 2015). It is suggested to complement these comparisons with longer duration experiments in future studies. The central objective of these intercalibrations is to ensure that the differences observed between research platforms do not create biases in the estimation of abundance and biomass (Simmonds and MacLennan, 2005; ICES, 2015). In this study, the application of F_{int} generated minor adjustments in the estimated biomass (<5.5% in all cases), without significant changes in the coefficients of variation, which supports the robustness of the procedure. For the correction of acoustic biomass estimates between vessels, the average ratio of acoustic densities (R_i) was chosen, due to its direct interpretation as an adjustment factor, as well as its lower relative variability (CV) compared to the error of the GLS model (RMSE). This approach allows for consistent and reproducible corrections to be applied to the biomass estimates obtained by the EACs, ensuring a high concordance with the reference values

lo que respalda la robustez del procedimiento. Para la corrección de las estimaciones de biomasa acústica entre embarcaciones, se optó por utilizar el cociente medio de densidades acústicas (R_i), debido a su interpretación directa como factor de ajuste, así como su menor variabilidad relativa (CV) en comparación con el error del modelo GLS (RMSE). Esta aproximación permite aplicar correcciones consistentes y reproducibles a las estimaciones de biomasa obtenidas por las EACs, asegurando una alta concordancia con los valores de referencia del BI Abate Molina.

Implicancias para los cruceros de evaluación acústica y la gestión pesquera

La intercalibración entre embarcaciones constituye un paso esencial para garantizar la comparabilidad de los datos acústicos, especialmente cuando se busca integrar información obtenida desde distintas plataformas a lo largo del tiempo. Diversos estudios han demostrado que, cuando los sistemas acústicos son equivalentes y se realiza una intercalibración adecuada, es posible combinar los datos sin introducir sesgos significativos (Røttingen, 1978; MacLennan y Pope, 1983; Simmonds *et al.*, 1998; Cotter, 2001; Leonori *et al.*, 2012; Carrera, 2015; Macaulay *et al.*, 2018; Massé *et al.*, 2018). Un ejemplo destacado se encuentra en el mar Adriático, donde la comparación entre dos buques de investigación no evidenció diferencias significativas en los datos acústicos recolectados, validando así su uso conjunto en evaluaciones futuras de biomasa (Leonori *et al.*, 2012). De manera similar, en cruceros acústicos dirigidos a especies pelágicas, la intercalibración entre los buques científicos Miguel Oliver y Thalassa mostró eficiencias comparables en ambas plataformas, sin efectos diferenciales en el comportamiento de los peces ni en las estimaciones de abundancia acústica (Carrera, 2015). No obstante, los ejercicios de intercalibración siguen siendo indispensables para evaluar el impacto potencial del cambio de buque en una serie temporal, así como para asegurar la coherencia metodológica en la combinación de datos provenientes de cruceros multiplataformas (Simmonds y MacLennan, 2005; ICES, 2015; Doray *et al.*, 2021).

Los resultados del presente estudio respaldan la viabilidad de integrar plataformas artesanales equipadas con ecosondas científicas EK80 en cruceros de evaluación hidroacústica. Si bien se identificaron diferencias entre embarcaciones, la aplicación de factores de intercalibración permitió armonizar las mediciones y obtener estimaciones robustas de la biomasa de anchoveta. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de realizar

of the RV Abate Molina.

Implications for acoustic survey cruises and fisheries management

The intercalibration between vessels is an essential step to ensure the comparability of acoustic data, especially when seeking to integrate information obtained from different platforms over time. Various studies have shown that when acoustic systems are equivalent and proper intercalibration is performed, it is possible to combine the data without introducing significant biases (Røttingen, 1978; MacLennan and Pope, 1983; Simmonds *et al.*, 1998; Cotter, 2001; Leonori *et al.*, 2012; Carrera, 2015; Macaulay *et al.*, 2018; Massé *et al.*, 2018). A notable example is found in the Adriatic Sea, where the comparison between two research vessels did not show statistically significant differences in the acoustic data collected, thus validating their joint use in future biomass assessments (Leonori *et al.*, 2012). Similarly, in acoustic survey targeting pelagic species, the intercalibration between the research vessels Miguel Oliver and Thalassa showed comparable efficiencies for both platforms, with no differential effects on fish behavior or acoustic abundance estimates (Carrera, 2015). However, intercalibration exercises remain essential to assess the potential impact of changing vessels in a time series, as well as to ensure methodological consistency in the combination of data from multiplatform cruises (Simmonds and MacLennan, 2005; ICES, 2015; Doray *et al.*, 2021).

The results of this study support the feasibility of integrating artisanal platforms equipped with EK80 scientific echosounders in hydroacoustic assessment cruises. Although differences between vessels were identified, the application of intercalibration factors allowed for the harmonization of measurements and the obtaining of robust estimates of Peruvian anchoveta biomass. These findings reinforce the need for periodic intercalibrations, particularly when aiming to maintain the comparability of time series or incorporate new observation platforms.

intercalibraciones periódicas, particularmente cuando se busca mantener la comparabilidad de series temporales o incorporar nuevas plataformas de observación.

CONCLUSIONES

Las mediciones acústicas obtenidas por embarcaciones artesanales equipadas con ecosondas EK80 fueron comparables a las del buque de investigación Abate Molina (EK60), con diferencias menores a 5.5% tras aplicar factores de intercalibración. El uso del cociente medio de densidades acústicas (R_i) permitió ajustes consistentes y con baja variabilidad. Estos resultados respaldan la integración de plataformas artesanales en cruceros hidroacústicos, ampliando la cobertura del monitoreo sin introducir sesgos significativos en la estimación de biomasa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al equipo del Departamento de Evaluaciones Directas (DED) del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) por su colaboración durante el desarrollo de este trabajo. Agradecimientos especiales a Don Sergio Lillo, por su liderazgo y orientación, que fueron fundamentales en su ámbito de contribución a esta investigación. Asimismo, se extiende sincero reconocimiento a las dotaciones de las embarcaciones artesanales y del buque de investigación Abate Molina, por su valiosa participación y compromiso durante la ejecución de este estudio.

CONCLUSIONS

The acoustic measurements obtained by artisanal vessels equipped with EK80 echo sounders were comparable to those of the research vessel Abate Molina (EK60), with differences of less than 5.5% after applying intercalibration factors. The use of the mean acoustic density ratio (R_i) allowed for consistent adjustments with low variability. These results support the integration of artisanal platforms in hydroacoustic cruises, expanding monitoring coverage without introducing significant biases in biomass estimation.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the team from the Direct Evaluations Department (DED) of the Fisheries Development Institute (IFOP) for their collaboration during the development of this work. Our special thanks to Mr. Sergio Lillo for his leadership and guidance, which were essential in his area of contribution to this research. We also wish to extend our sincere recognition to the crews of the artisanal vessels and the research ship Abate Molina for their valuable participation and commitment during the execution of this study.

BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Adekeye, K. (2013). Process capability indices based on median absolute deviation. *International Journal of Applied Science and Technology*, 3(4), p. 6. Available at: https://ijastnet.com/journals/Vol_3_No_4_April_2013/5.pdf.
- Alheit, J. and Niquen, M. (2004). Regime shifts in the Humboldt Current ecosystem. *Progress in Oceanography*, 60(2–4), pp 201–222. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2004.02.006>.
- Andersen, L.N. (2001). The new Simrad EK60 scientific echo sounder system. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(5_Supplement), pp. 2336–2336. doi: <https://doi.org/10.1121/1.4744207>.
- Annasawmy, P., Horne, J. K., Reiss, C. S., Cutter, G. R. and Macaulay, G. J. (2024). Field comparison of Antarctic krill (*Euphausia superba*) backscatter and aggregation types using NORTEK and SIMRAD echosounders. *ICES Journal of Marine Science*. Edited by O.R. Godo, p. fsae093. doi: <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsae093>.
- Arel-Bundock, V. (2022). Modelsummary: Data and model summaries in R. *Journal of Statistical Software*, 103(1). doi: <https://doi.org/10.18637/jss.v103.i01>.
- Armas, E., Arancibia, H., Neira, S. and Marín, M. C. (2024). Neural network approach for detecting spatial changes in catch probability of *Engraulis ringens* during El Niño-Southern Oscillation events in northern Chile. *Fisheries Oceanography*, 33(4). doi: <https://doi.org/10.1111/fog.12672>.
- Bertrand, A., Segura, M., Gutiérrez, M. and Vásquez, L. (2004). From small-scale habitat loopholes to decadal cycles: a habitat-based hypothesis explaining fluctuation in pelagic fish populations off Peru. *Fish and Fisheries*, 5(4), pp. 296–316. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-2679.2004.00165.x>.
- Canales, C. M., Adasme, N. A., Cubillos, L. A., Cuevas, M. J., Sánchez, N. and Kuparinen, A. (2018). Long-time spatio-temporal variations in anchovy *Engraulis ringens* biological traits off northern Chile: An adaptive response to long-term environmental change? *ICES Journal of Marine Science*, 75(6), pp. 1908–1923. doi: <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy082>.
- Carrera, P. (2015). Estudio de la dinámica de poblaciones pelágicas de peces mediante técnicas hidroacústicas. *Centro Oceanográfico de Vigo* [Preprint]. Available at: <https://agris.fao.org/search/en/providers/122367/records/647480adbf943c8c79887ca3>
- Castillo, J., Saavedra, A., Leiva, F., La Cruz, L., Alegría, N., Núñez, S., Silva, J. y Sepúlveda, A. (2022). Estimación de la fuerza de blanco (TS) para las unidades demográficas de anchoveta a nivel nacional 2020-2019. *Instituto de Fomento Pesquero*, p. 170. Available at: https://www.subpesca.cl/fipa/613/articles-116770_informe_final.pdf.
- Castillo, P., Peña, C., Grados, D., La Cruz, L., Valdez, C., Pozada-Herrera, M. and Cornejo, R. (2022). Characteristics of anchoveta *Engraulis ringens* schools in the optimum zone and the physiological stress zone of its distribution between 2011 and 2021. *Fisheries Oceanography*, 31(5), pp. 510–523. doi: <https://doi.org/10.1111/fog.12601>.
- Castillo, P., Bouchón, M., Vásquez, L., Cuadros, G., Grados, D., Valdez, C. and Pozada-Herrera, M. (2025). Behaviour and size distribution of anchoveta *Engraulis ringens* under El Niño 2023 in the Northern Humboldt Current System. *Scientia Marina*, 89(1), p. e097. doi: <https://doi.org/10.3989/scimar.05547.097>.
- Cerna, F., Gómez, M., Moyano, G., Plaza, G. and Morales-Nin, B. (2022). Spatial and inter-annual changes in the growth patterns of young-of-year anchovy in a high productive ecosystem. *Fisheries Research*, 249, p. 106236. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2022.106236>.
- Chander, G., Hewison, T. J., Fox, N., Wu, X., Xiong, X. and Blackwell, W. J. (2013). Overview of intercalibration of satellite instruments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3), pp. 1056–1080. doi: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2228654>.
- Cotter, A. (2001). Intercalibration of North Sea International Bottom Trawl Surveys by fitting year-class curves. *ICES Journal of Marine Science*, 58(3), pp. 622–632. doi: <https://doi.org/10.1006/jmsc.2001.1068>.
- Cuadros Caballero, G. R., Castillo, P. R., La Cruz, L., Valdez, C., Peña, C., Chacón, G., Escudero, L. y Salcedo, J. (2024). Variabilidad de la anchoveta *Engraulis ringens* entre febrero y junio en la zona restringida a la pesca industrial en el inicio de la primera temporada de pesca del 2022. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 53(1), pp. 145–166. doi: <https://doi.org/10.25268/bimc.invenmar.2024.53.1.1246>.
- De Robertis, A. and Handegard, N.O. (2013). Fish avoidance of research vessels and the efficacy of noise-reduced vessels: a review. *ICES Journal of Marine Science*, 70(1), pp. 34–45. doi: <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss155>.
- De Robertis, A., Lawrence-Slavas, N., Jenkins, R., Wangen, I., Mordy, C. W., Meinig, C., Levine, M., Peacock, D. and Tabisola, H. (2019). Long-term measurements of fish backscatter from Saildrone unmanned surface vehicles and comparison with observations from a noise-reduced research vessel. *ICES Journal of Marine Science*. 76(7), pp. 2459–2470. doi: <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz124>.
- Demer, D., Berger, L., Bernasconi, M., Bethke, E., Boswell, K., Chu, D., Domokos, R., Dunford, A., Fässler, S., Gauthier, S., Hufnagle, L., Jech, M., Bouffant, N., Lebourges-Dhaussy, A., Lurton, X., Macaulay, G., Perrot, P., Ryan, T., Parker-Stetter, S., Williamson, N. (2015). Calibration of acoustic instruments. *International Council for the Exploration of the Sea (ICES) (ICES)*, p.133. doi: <https://doi.org/10.17895/ICES.PUB.5494>.
- Demer, D., Andersen, L., Bassett, C., Berger, L., Chu, D., Condiotty, J., Hutton, B., Korneliussen, R., Bouffant, N. L., Macaulay, G. and others. (2017). 2016 USA–Norway EK80 Workshop Report: Evaluation of a wideband echosounder for fisheries and marine ecosystem science. *ICES Cooperative Research Re-port No. 336*, p. 69. doi: <https://doi.org/10.17895/ices.pub.2318>.
- Doray, M. (2021). ICES Survey Protocols. Manual for acoustic surveys coordinated under ICES Working Group on Acoustic and Egg Surveys for Small Pelagic Fish (WGACEGG). *ICES Techniques in Marine Environmental Sciences*, 64, p. 100. doi: <https://doi.org/10.17895/ICES.PUB.7462>.
- FAO (2024). *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2024*. FAO; IFAD; WHO; WFP; UNICEF. doi: <https://doi.org/10.4060/cd1254es>.
- Foot, K., Knudsen, F., Vestnes, G., MacLennan, D. and Simmonds, J. (1987). Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide. *International Council for the Exploration of the Sea, Cooperative Research Report*, (144), p. 72. doi: <https://courses.washington.edu/fish538/resources/CRR%20144%20acoustic%20calibration.pdf>.
- Ganias, K. (2014). *Biology and ecology of sardines and anchovies*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group. doi: <https://doi.org/10.1201/b16682>.
- Garcés, C., Niklitschek, E.J., Plaza, G., Cerna, F., Leisen, M., Toledo, P. and

- Barra, F. (2019). Anchoveta *Engraulis ringens* along the Chilean coast: Management units, demographic units and water masses: Insights from multiple otolith-based approaches. *Fisheries Oceanography*, 28(6), pp.735–750. doi: <https://doi.org/10.1111/fog.12455>
- Gawarkiewicz, G. and Malek Mercer, A. (2019). Partnering with fishing fleets to monitor ocean conditions. *Annual Review of Marine Science*, 11(1), pp. 391–411. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010318-095201>.
- Gerlotto, F., Castillo, J., Saavedra, A., Barbieri, M. A., Espejo, M. and Cotel, P. (2004). Three-dimensional structure and avoidance behaviour of anchovy and common sardine schools in central southern Chile. *ICES Journal of Marine Science*, pp. 1120–1126. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2004.07.017>.
- Gutiérrez, M., Vásquez, C., Peraltila, S., Aliaga, A., Zuzunaga, A., Méndez, E., Yarlequé, E. and Munaylla, U. (2016). Notes on Peruvian experience on acoustic data collection. *South Pacific Regional Fisheries Management Organization. 4th Meeting of the Scientific Committee*. doi: <https://sprfmo.int/assets/Meetings/Meetings-2013-plus/SC-Meetings/4th-SC-Meeting-2016/SC04-papers/f4c3b97152/SC-04-26-Notes-on-Peruvian-Experience-on-Acoustic-Data-Collection-v2.pdf>.
- Hernández-Santoro, C., Landaeta, M.F. and Castillo Pizarro, J. (2019). Effect of ENSO on the distribution and concentration of catches and reproductive activity of anchovy *Engraulis ringens* in northern Chile. *Fisheries Oceanography*, 28(3), pp. 241–255. doi: <https://doi.org/10.1111/fog.12405>.
- Hilborn, R. (2003). The state of the art in stock assessment: where we are and where we are going. *Scientia Marina*, 67(S1), pp. 15–20. doi: <https://doi.org/10.3989/scimar.2003.67s115>.
- ICES (2015). SISP 9 Manual for International Pelagic Surveys (IPS) - Version 1.00. Series of ICES Survey Protocols SISP 9 – IPS. p. 92. doi: <https://doi.org/10.17895/ICES.PUB.7582>.
- IFOP (2025). Chilean scientific vessels. Valparaíso: IFOP, 13 mayo 2021. Instituto de Fomento Pesquero. Available at: <https://www.ifop.cl/en/buques-cientificos-chilenos/> (Accessed: 25 June 2025).
- Ladroit, Y., Escobar-Flores, P. C., Schimel, A. C. G. and O'Driscoll, R. L. (2020). ESP3: An open-source software for the quantitative processing of hydro-acoustic data. *SoftwareX*, 12, p. 100581. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100581>.
- Leonori, I., Tičina, V., De Felice, A., Vidjak, O., Grubišić, L. and Pallaoro, A. (2012). Comparisons of two research vessels' properties in the acoustic surveys of small pelagic fish. *Acta Adriatica*, 53(3), pp. 389–398. Available at: <https://acta.izor.hr/ojs/index.php/acta/article/view/306>.
- Macaulay, G. J., Scoulding, B., Ona, E. and Fässler, S. M. M. (2018). Comparisons of echo-integration performance from two multiplexed echosounders. *ICES Journal of Marine Science*, 75(6), pp. 2276–2285. doi: <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy111>.
- MacLennan, D.N. (1990). Acoustical measurement of fish abundance. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 87(1), pp. 1–15. doi: <https://doi.org/10.1121/1.399285>.
- MacLennan, D. and Pope, J. (1983). Analysis procedure for the inter-ship calibration of echo integrators. *International Council for the Exploration of the Sea*, p. 11. doi: https://www.ices.dk/sites/pub/CM%20Documents/1983/B/1983_B22.pdf.
- MacLennan, D., Fernandes, P. and Dalen, J. (2002). A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics. *ICES Journal of Marine Science*, 59(2), pp. 365–369. doi: <https://doi.org/10.1006/jmsc.2001.1158>.
- Manso-Narvarte, I., Solabarrieta, L., Caballero, A., Anabitarte, A., Knockaert, C., Dhondt, C. A. L. and Fernandes-Salvador, J. A. (2024). Fishing vessels as met-ocean data collection platforms: data lifecycle from acquisition to sharing. *Frontiers in Marine Science*, 11, p. 1467439. doi: <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1467439>.
- Massé, J., Uriarte, A., Angélico, M., Carrera, P. and Eds. (2018). Pelagic survey series for sardine and anchovy in ICES subareas 8 and 9? Towards an ecosystem approach. *ICES Cooperative Research Reports (CRR)*, 332, p. 268. doi: <https://doi.org/10.17895/ICES.PUB.4599>.
- Melvin, G.D., Kloser, R. and Honkalehto, T. (2016). The adaptation of acoustic data from commercial fishing vessels in resource assessment and ecosystem monitoring. *Fisheries Research*, 178, pp. 13–25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.09.010>.
- Ñiquen, M. and Bouchon, M. (2004). Impact of El Niño events on pelagic fisheries in Peruvian Waters. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(6–9), pp. 563–574. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.03.001>.
- Pinheiro, J. and Bates, D. (2000). *Mixed-Effects Models in S and S-PLUS*. New York: Springer-Verlag (Statistics and Computing). doi: <https://doi.org/10.1007/b98882>.
- Robotham, H. and Castillo, J. (1990). The bootstrap method: an alternative for estimating confidence intervals of resources surveyed by hydroacoustic techniques. *Rapp. P.-v. Reun. Cons. Int. Explor. Mer*, 189, pp. 421–424. doi: <https://cienciasbasicas.udp.cl/cms/wp-content/uploads/2019/06/32.pdf>.
- Robotham, H., Bosch, P., Gutiérrez-Estrada, J. C., Castillo, J. and Pulido-Calvo, I. (2010). Acoustic identification of small pelagic fish species in Chile using support vector machines and neural networks. *Fisheries Research*, 102(1–2), pp. 115–122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2009.10.015>.
- Røttingen, I. (1978). Field intercalibrations of echo integrator systems. *International Council for the Exploration of the Sea (ICES CM Documents:1978/B:25)*, p. 23. Available at: https://imr.brage.unit.no/imr-mlui/bitstream/handle/11250/103307/CM_1978_B_25.pdf?sequence=1.
- R Core Team (2024). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available at: <https://www.R-project.org/>
- Silva, C., Andrade, I., Yáñez, E., Hormazabal, S., Barbieri, M. Á., Aranís, A. and Böhm, G. (2016). Predicting habitat suitability and geographic distribution of anchovy *Engraulis ringens* due to climate change in the coastal areas off Chile. *Progress in Oceanography*, 146, pp. 159–174. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2016.06.006>.
- Simmonds, J. and MacLennan, D. (2005). *Fisheries acoustics: theory and practice*. 2nd ed. Oxford; Ames, Iowa: Wiley-Blackwell (Fish and aquatic resources series, 10). doi: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470995303?msocid=27319c98976d69550ca088559680688f>.
- Simmonds, J., Toresen, R., Pedersen, J. P. and Götze, E. (1998). Inter-calibration of participating vessels in the ICES coordinated surveys of North Sea herring. *International Council for the Exploration of the Sea [Preprint]*. doi: <https://www.vliz.be/imisdocs/publications/ocrd/275731.pdf>.
- Swart, S., Zietsman, J., Coetzee, J., Goslett, D., Hoek, A., Needham, D. and

Monteiro, P. (2016). Ocean robotics in support of fisheries research and management. *African Journal of Marine Science*, 38(4), pp. 525–538. doi: <https://doi.org/10.2989/1814232X.2016.1251971>.

Zhu, Y., Kenji, M., Tokeshi, T., Nishiyama, Y., Kasai, A., Matsuura, M., Horie, H. and Miyashita, K. (2024). Calibration of commercial fisheries echo sounders using seabed backscatter for the estimation of fishery resources. *PLOS ONE*. Edited by V.H.R. Paiva, 19(5), p. e0301689. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0301689>.



Este es un manuscrito de acceso abierto bajo la licencia
CC Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual /
This is an open Access article under the CC BY-NC-SA