

TECHNICAL PAPER

## Validación de hidrófonos de bajo costo para la detección acústica de los delfines nariz de botella (*Tursiops truncatus truncatus*) en un ambiente controlado

AGUSTINA C. MACCHI<sup>1, \*</sup>, BRUNO V. MENNA<sup>2</sup>, ARIEL G. CABREIRA<sup>2</sup>, DIEGO H. RODRIGUEZ<sup>1</sup>,  
ALEJANDRO SAUBIDET<sup>3</sup>, JAVIER OLGUIN<sup>3</sup> y GISELA V. GIARDINO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (IIMyC), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP), Juan B. Justo 2550, B7608FBY - Mar del Plata, Argentina. <sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP), Paseo Victoria Ocampo N° 1, Escollera Norte, B7602HSA - Mar del Plata, Argentina.

<sup>3</sup>Aquarium Mar del Plata, Av. de los Trabajadores 5600, B7600 - Mar del Plata, Argentina.

ORCID Agustina C. Macchi  <https://orcid.org/0009-0007-3695-6257>, Bruno V. Menna  <https://orcid.org/0000-0002-0509-0362>, Ariel G. Cabreira  <https://orcid.org/0009-0009-5184-6165>, Diego H. Rodriguez  <https://orcid.org/0000-0002-5080-3739>, Gisela V. Giardino  <https://orcid.org/0000-0002-4536-2908>



\*Correspondence:  
agustina.camila.macchi@gmail.com

Received: 26 March 2025

Accepted: 1 July 2025

ISSN 2683-7595 (print)  
ISSN 2683-7951 (online)

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

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



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

**RESUMEN.** En los últimos años, la acústica pasiva se ha convertido en una herramienta eficaz para la detección de cetáceos, particularmente en especies difíciles de observar. Además de ser una técnica no invasiva, permite monitorear a los animales sin perturbarlos, independientemente de la visibilidad. Sin embargo, el alto costo del equipamiento asociado a esta técnica presenta un obstáculo significativo para países en vías de desarrollo. El objetivo del presente proyecto fue comparar las señales acústicas del delfín nariz de botella (*Tursiops truncatus truncatus*) obtenidas mediante un hidrófono autocontenido comercial y otro de bajo costo, fabricado artesanalmente. Para ello, se realizaron grabaciones en el establecimiento Aquarium Mar del Plata, Argentina, empleando ambos hidrófonos colocados de manera simultánea durante un periodo de 50 min. Se caracterizaron las señales obtenidas y se contabilizaron las señales tonales (silbidos) para cada instrumento. De cada silbido se obtuvieron parámetros robustos utilizando el programa Raven Pro. A partir del análisis de los silbidos coincidentes, se determinó que los parámetros medidos no presentaron diferencias significativas entre ambos instrumentos, demostrando la efectividad de los hidrófonos de bajo costo para registrar acústicamente a los delfines nariz de botella en ambientes controlados, con posibilidad de aplicarlos en otros entornos como mar abierto.

**Palabras clave:** Acústica pasiva, cetáceos, silbido.

### Validation of low-cost hydrophones for acoustic detection of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus truncatus*) in a controlled environment

**ABSTRACT.** In recent years, passive acoustics has emerged as an effective tool for detecting cetaceans, particularly in difficult-to-observe species. In addition to being a non-invasive technique, it allows for animal monitoring without disturbing them, regardless of visibility conditions. However, the high cost of the equipment associated with this technique presents a significant challenge for developing countries. The objective of this project was to compare acoustic signals of the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus truncatus*) recorded using a commercial self-contained hydrophone and a low-cost, handcrafted alternative. Recordings were conducted at the Aquarium Mar del Plata, Argentina, using both hydrophones simultaneously over a 50-min period. Recorded signals were characterized and tonal signals (whistles) detected by each device were counted. Robust parameters for each

whistle were obtained using the Raven Pro software. Based on the analysis of coincident whistles, it was determined that the measured parameters did not show significant differences between the two instruments, demonstrating the effectiveness of low-cost hydrophones for acoustically monitoring bottlenose dolphins in controlled environments, with the potential for use in other settings such as open water.

**Key words:** Passive acoustics, cetaceans, whistle.

---

## INTRODUCCIÓN

---

En el medio marino, las ondas sonoras tienen la capacidad de propagarse de manera más eficiente y con mayor rapidez que en el medio terrestre (Hawkes y Nehorai 1998; Carpenter et al. 2006). Es por ello que los organismos marinos utilizan el sonido de manera tanto activa como pasiva para todas las actividades de importancia biológica como navegación, alimentación, apareamiento, cohesión de grupo o comunicación (Au 1993; Berta et al. 2015; Erbe et al. 2022). Los cetáceos, en particular, producen una gran variedad de sonidos, incluyendo señales tonales y pulsos, en un amplio rango de frecuencias que van desde los pocos Hz a cientos de kHz (Au y Hastings 2008). En general, se considera que los pulsos producidos por los cetáceos odontocetos son utilizadas fundamentalmente para la ecolocalización (Au 1993), pero pueden ser utilizados también para comunicarse, como ocurre en *Phocoena phocoena* (Clausen et al. 2011), *Neophocaena asiaeorientalis* (Terada et al. 2022) y *Pontoporia blainvillei* (Giardino et al. 2024). Por otro lado, las señales tonales como los silbidos, suelen estar relacionadas con cuestiones sociales como comunicación, llamado hacia pares o cohesión del grupo (Santos et al. 2005).

Dentro de los odontocetos, la especie acústicamente más conocida es el delfín nariz de botella (*Tursiops truncatus truncatus*) (HersHKovitz, 1966), debido a su frecuente presencia en oceanarios. Esta especie produce sonidos de ecolocalización de banda ancha y alta frecuencia que consisten en pulsos conocidos como *clicks*, caracterizados por ser cortos (50-80  $\mu$ s) en duración, con frecuencias entre

40-130 kHz (Au y Hastings 2008; Harder et al. 2016), que se repiten con un intervalo entre *clicks* (ICI, *Inter-Click Interval* -por sus siglas en inglés) alrededor de 80  $\mu$ s (Buscaino et al. 2015). Las señales tonales o silbidos, en cambio, se caracterizan por ser de banda estrecha, con energía por debajo de los 20 a 30 kHz y por tener un patrón de frecuencia modulado (Jones et al. 2020), lo que permite la comparación entre poblaciones (Bazúa-Durán y Au 2002). Un ejemplo muy estudiado, es el caso de los silbidos firma (Janik y Sayigh 2013) utilizados para diferenciar individuos de delfines debido a que presentan formas estereotipadas y su modulación de frecuencia no cambian en el tiempo. Dentro de las señales tonales producidas por los delfines nariz de botella, se encuentran los denominados chillido (*chirps*), definidos como emisiones breves que abarcan un amplio rango de frecuencias en fracciones de segundo (Jones et al. 2020). Aunque se ha sugerido que estas señales están asociadas a comportamientos socio-sexuales, su función específica sigue siendo poco comprendida (Lima 2017). También se han descrito otras señales tonales menos estudiadas, como los rebuznos (*brays calls*), sollozos (*moans*) y chirridos (*squeaks*), cuya caracterización varía entre autores (Pace et al. 2012; Janik y Sayigh 2013; Jones et al. 2020).

El estudio de los sonidos producidos por los cetáceos se ha beneficiado al implementarse el uso de la acústica pasiva, una herramienta fundamental para el estudio de los sonidos subacuáticos, sobre todo en especies difíciles de observar (Mellinger et al. 2007). Su aplicación permite la identificación y localización de individuos, ocurrencia, distribución, uso de hábitat y posibles interacciones (Saheban y Kordrostami 2021). El principal instrumento utilizado es el hidrófono, un micrófono subacuático que convierte

la energía de las ondas mecánicas submarinas en energía eléctrica, permitiendo detectar y registrar los sonidos. El mismo se conecta a un convertidor analógico digital que digitaliza la señal para poder almacenarla y analizarla posteriormente (Saheban y Kordrostami 2021). Existe una amplia gama de hidrófonos, aunque algunos de estos instrumentos suelen ser costosos y de difícil acceso para proyectos con bajo presupuesto (Romero y León-López 2010; De Marco et al. 2023). Por esta cuestión, es posible categorizar dos tipos de hidrófonos: autocontenidos y cableados. Los dispositivos autónomos y los sistemas cableados conectados a grabadoras presentan diferencias en su diseño y funcionamiento. Los dispositivos autónomos son sistemas completamente independientes, capaces de operar sin conexión a un equipamiento externo, lo que facilita su despliegue en distintas áreas y a mayores profundidades. Sin embargo, su capacidad de almacenamiento y duración de batería pueden limitar el tiempo de muestreo continuo. En contraste, los sistemas cableados dependen de una conexión directa a una grabadora, lo que generalmente permite registros de transmisión en tiempo real, aunque queda limitado a la sensibilidad de la grabadora utilizada. Además de la necesidad de un operario capacitado para la obtención de registros y de la posibilidad de encontrar la especie de interés. Sin embargo, el costo de elaboración de estos instrumentos es menor y su acceso es considerablemente más sencillo. Por ello, dependiendo del objetivo en cuestión será cuál sistema es más adecuado para estudios teniendo en cuenta la especie y el área de muestreos.

En este contexto, el desarrollo de hidrófonos de bajo costo facilita el monitoreo continuo de sonidos, especialmente en áreas con un alto riesgo de pérdida de equipos, como aquellas con intensa actividad pesquera. Investigaciones previas han demostrado la viabilidad de estos sistemas basados en sensores piezoeléctricos conectados a grabadoras, integrados en redes de pesca o trampas para la captura de organismos marinos (Cabreira et al. 2015, 2017), e incluso encapsulados en dispositivos estanco (Giardino datos no publicados), obteniendo

resultados positivos. Esto es particularmente relevante para estudios de cetáceos odontocetos que pueden verse afectados por la captura incidental o enmallados en redes de pesca. De tal manera, sería interesante estudiar detalladamente cómo son las posibles señales de odontocetos obtenidas por estos instrumentos, teniendo presente cómo último propósito aplicarlo a mayor escala, ampliando áreas de estudio o incrementando el volumen de datos con costos regulares. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue comparar las señales acústicas de los delfines nariz de botella (*T. truncatus truncatus*) en un ambiente controlado situado en la Argentina, adquiridas de manera simultánea mediante un hidrófono de bajo costo y un hidrófono comercial. En el presente documento se detalla la presencia de las señales acústicas, tanto tonales como pulsos y se evalúa el número, forma y parámetros acústicos para las señales tonales (silbidos) de los delfines nariz de botella.

---

## MATERIALES Y MÉTODOS

---

### Área de estudio

El estudio fue realizado en las instalaciones del parque temático Aquarium Mar del Plata, ubicado al sur de la ciudad de Mar del Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina (38° 05' 20,32" S; 57° 32' 38,10" W) durante 2022. El establecimiento contaba con once delfines nariz de botella (*T. truncatus truncatus*) que convivían en una serie de cuatro piscinas interconectadas con diferentes medidas.

### Adquisición de registros sonoros

Los registros sonoros se basaron en los sonidos subacuáticos de los seis delfines que habitaban la piscina principal, cuyo volumen era de 2.100 m<sup>3</sup>, y una profundidad aproximada de 8,5 m. Se utilizaron dos hidrófonos: A) Hidrófono autocontenido comercial *Soundtrap* ST300 HF (ST, Ocean Instru-

ments, Auckland, New Zealand), con una frecuencia de muestreo de 192 kHz y una sensibilidad de 176.4 dB re 1V/Pa (Figura 1 A), y B) Hidrófono de bajo costo, confeccionado por el Gabinete de Hidroacústica del Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP), que consta de dos piezoeléctricos conectados dentro de un tubo de PVC. El mismo está conectado por medio de un cable estéreo a una grabadora digital portátil Zoom H12 *Handy Recorder*, almacenando los datos en una memoria SD con un formato de grabación WAV a 24 bit, una frecuencia de muestreo de 96 kHz y un máximo de nivel de presión del sonido de 120 dB SPL (Figura 1 B). Cabe señalar que las frecuencias de muestreos utilizadas difieren entre los equipos empleados debido a sus características técnicas y a las condiciones particulares de uso en el momento de estudio. El hidrófono de bajo costo, se utilizó a la máxima frecuencia de muestreo posible que la grabadora permite, mientras que el hidrófono comercial estaba siendo utilizado simultáneamente en el marco de una tesis de grado. Se trabajó con los datos registrados con una frecuencia de muestreo

previamente definida. Esta situación constituyó una limitación reconocida y fue considerada al momento de interpretar los resultados.

Para la adquisición de datos, se colocaron sincrónicamente ambos hidrófonos, uno al lado del otro, sobre el borde izquierdo de la piscina principal. Los dispositivos fueron sincronizados manualmente, iniciando las grabaciones al mismo tiempo, es decir, a la misma hora, minuto y segundo, para asegurar la coincidencia temporal entre ambos registros. El dispositivo comercial *SoundTrap* se colocó en un tubo de PVC sumergido en el agua, metodología previamente utilizada para otros estudios donde se observó que no afecta la grabación de los delfines nariz de botella de Aquarium Mar del Plata (Macchi 2024). A su vez, el hidrófono de bajo costo, se colocó lindante al otro hidrófono sostenido manualmente. Ambos se encontraban por detrás de una baranda que restringe el acceso de los delfines a una pequeña plataforma delantera. Los delfines nadaban por todo el recinto, por ende, la distancia de estos al hidrófono variaba en todo momento (Figura 2).

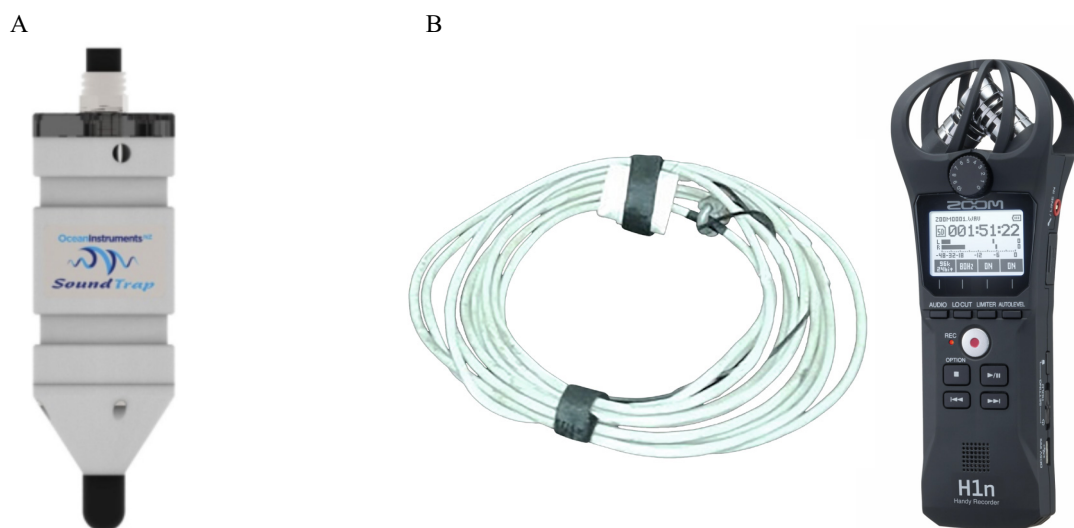


Figura 1. A) Hidrófono comercial autocontenido *Soundtrap* ST300 HF (ST, Ocean Instruments, Auckland, New Zealand). B) Hidrófono casero de bajo costo con cable estéreo en el extremo soporte de PVC y grabadora digital Zoom H12 *Handy Recorder* portátil.

Figure 1. A) Self-contained commercial hydrophone *Soundtrap* ST300 HF (ST, Ocean Instruments, Auckland, New Zealand). B) Low-cost homemade hydrophone with stereo cable on the end, PVC stand, and portable Zoom H12 *Handy Recorder*.



Figura 2. Toma de registros acústicos de los delfines nariz de botella de Aquarium Mar del Plata, Argentina, con el hidrófono de bajo costo y el hidrófono comercial de manera sincrónica. Los ejemplares permanecieron detrás de las barandas, restringiendo su acceso.

*Figure 2. Synchronous acoustic recordings of bottlenose dolphins with the low-cost hydrophone and the commercial hydrophone at Aquarium Mar del Plata, Argentina. Dolphins remained behind railings to restrict their access.*

### Análisis de datos

Los sonidos subacuáticos registrados fueron analizados con el programa Raven Pro 1.6 (Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, NY, USA) (Charif et al. 2010). Se determinó la presencia de pulsos de señal y tonales como silbidos y chillidos. Se contabilizaron los silbidos detectados en cada uno de los instrumentos y se determinó la forma de los mismos, siguiendo la metodología empleada en Macchi (2024). Cada uno de los silbidos registrados fueron categorizados de acuerdo con su forma o contorno (Bazúa-Durán 2004; Au y Hastings 2008; Hickey et al. 2009) en 6 categorías principales: ascendente (A); descendente (B); constante (C); convexo (D); cóncavo (E) y modulado continuo (F) (Figura 3). La categorización en una forma estereotipada será utilizada en estudios posteriores. En el presente trabajo se utilizó como referencia de una señal claramente identificable para poder medir parámetros robustos de interés. Los silbidos a los que fue posi-

ble adjudicar una forma estereotipada en el hidrófono de bajo costo, se intentaron localizar en los audios registrados por el hidrófono comercial para realizar la comparación posteriormente.

Para el análisis de los silbidos, se tuvo un criterio de calidad que contemple: i) una forma estereotipada fácilmente identificable su principio y final, ii) que la superposición no supere dos silbidos, y iii) la visualización completa de la totalidad de la señal tonal en el espectrograma (Bazúa-Durán y Au 2002). Solo en aquellos silbidos en los que coincidió la forma entre ambos instrumentos, se midieron la duración 90%, ancho de banda 90% (kHz), frecuencia pico (kHz) y frecuencia central (kHz). Dichos parámetros, reflejan las propiedades de la señal, al independizarse de los límites de la selección manual y al minimizar la variabilidad introducida por el operador. Esta elección permite una descripción más precisa y robusta de las vocalizaciones, si se quisiera la comparación con estudios previos o posteriores.

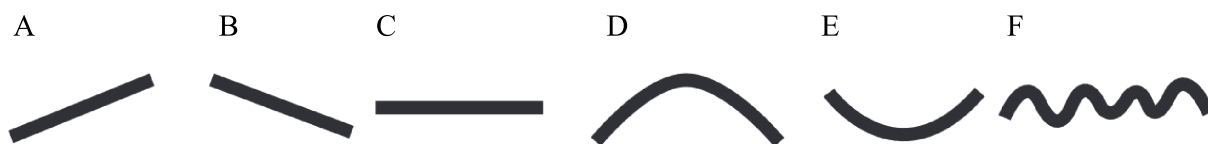


Figura 3. Categorización de los silbidos de los delfines nariz de botella registrados en el Aquarium Mar del Plata: ascendente (A); descendente (B); constante (C); convexo (D); cóncavo (E) y modulado continuo (F).

Figure 3. Categorization of bottlenose dolphin whistles recorded at Aquarium Mar del Plata: ascending (A); descending (B); constant (C); convex (D); concave (E); and continuously modulated (F).

Los espectrogramas se realizaron con el programa RStudio 2024.04.1 (Posit Software PBC 2024), y se utilizó el paquete Seewave (Sueur et al. 2008; Charrier et al. 2023). Se realizó la normalización de los registros para minimizar variaciones debidas a diferencias en la intensidad de grabación y facilitar la comparación entre señales. Este procedimiento es común en análisis bioacústicos y se efectuó siguiendo procedimientos estándar, que vienen incluidos en el programa Audacity 3.5.1. (GNU Licencia Pública General, Equipo de Audacity, Pittsburgh, Pensilvania), ajustando las señales para que sus valores máximos tuvieran una referencia uniforme. Luego, se realizó la comparación de los parámetros medidos por cada instrumento a través de un test de Wilcoxon o Mann-Whitney-Wilcoxon (Shahbaba 2012). Los resultados se reportaron como media ( $\bar{X}$ )  $\pm$  desvío estándar (DS) (mínimo-máximo –Mín., Máx.).

## RESULTADOS

Durante 52 min y 51 s de grabación para cada equipo, se lograron identificar pulsos de señal (*clicks*) y señales tonales (*chirps* y silbidos). Se registraron un total de 237 silbidos con el hidrófono autocontenido comercial y 170 con el hidrófono de bajo costo. El hidrófono comercial detectó un 28,3% más de silbidos que el hidrófono de bajo costo, presentando un 71,2% de coincidencia (89 silbidos) entre ambos claramente identificables y con buena señal. A modo ilustrativo, se presentan espectrogramas ejemplo correspondientes a seña-

las registradas por ambos hidrófonos (Apéndice, Figura A1).

En cuanto a los parámetros robustos de los silbidos registrados, que incluyen ancho de banda 90%, duración 90%, frecuencia pico y frecuencia central, no se presentaron diferencias significativas dependiendo del instrumento utilizado. En promedio, el ancho de banda 90% de los silbidos registrados con el hidrófono de bajo costo fue de  $5,12 \pm 2,26$  (0,37-14,62) kHz, mientras que para el hidrófono comercial fue de  $5,59 \pm 3,13$  (0,37-14,62) kHz. No se hallaron diferencias significativas para dicho parámetro entre instrumentos (Test de Wilcoxon  $V = 2.238,5$ ;  $p > 0,05$ ). Lo mismo ocurrió para la frecuencia central que en promedio fue mayor para el hidrófono comercial con respecto al hidrófono de bajo costo:  $7,61 \pm 2,84$  (2,62-17,25) kHz y  $7,55 \pm 2,91$  (3,19-15,75) kHz, respectivamente. No obstante, dicho parámetro no arrojó diferencias significativas entre los instrumentos estudiados (Test de Wilcoxon,  $V = 1,795$ ;  $p > 0,05$ ). En promedio, la duración 90% de los silbidos obtenidos por el hidrófono comercial fue de  $0,44 \pm 0,27$  s (Mín.: 0,0013-Máx.: 1,38), mientras que para el hidrófono de bajo costo la duración fue de  $0,42 \pm 0,26$  s (Mín.: 0,0027-Máx.: 1,42). De esta manera, la duración de los silbidos no fue significativamente diferente entre los hidrófonos en estudio (Test de Wilcoxon,  $V = 2.228,5$ ;  $p > 0,05$ ).

En lo que respecta a la frecuencia pico, el valor promedio para el hidrófono comercial fue de  $7,01 \pm 3,02$  kHz (Mín.: 1,86- Máx.: 15,75), menor al hidrófono de bajo costo que registró  $7,28 \pm 3,03$  kHz (Mín.: 2,62-Máx.: 14,25). Al igual que los otros tres parámetros robustos medidos, no se en-

Tabla 1. Parámetros robustos de los silbidos los equipos *Soundtrap* y de bajo costo a partir de los registros obtenidos de los delfines nariz de botella de Aquarium Mar del Plata, Argentina. DS = desvío estándar; CV = coeficiente de variación; Mín. = mínimo valor observado, Máx. = máximo valor observado; V = w de Test de Wilcoxon para muestras apareadas. Significancia = NS (no significancia).

Table 1. Robust whistle parameters for *Soundtrap* and low-cost equipment based on recordings from bottlenose dolphins at Aquarium Mar del Plata, Argentina. DS = standard deviation; CV = coefficient of variation; Min. = minimum observed value; Máx. = maximum observed value; V = Wilcoxon paired-samples test value. Significancia = significance, NS (not significant).

| Parámetros               | Hidrófono        | Media | DS   | CV   | Mín.  | Máx.  | V     | Significancia |
|--------------------------|------------------|-------|------|------|-------|-------|-------|---------------|
| Ancho de banda 90% (kHz) | <i>Soundtrap</i> | 5,79  | 3,13 | 0,54 | 0,37  | 14,62 | 2.232 | NS            |
|                          | Bajo costo       | 5,12  | 2,26 | 0,44 | 0,37  | 14,62 |       |               |
| Duración al 90% (s)      | <i>Soundtrap</i> | 0,44  | 0,27 | 0,61 | 0,001 | 1,38  | 2.469 | NS            |
|                          | Bajo costo       | 0,42  | 0,26 | 0,62 | 0,002 | 1,42  |       |               |
| Pico de frecuencia (kHz) | <i>Soundtrap</i> | 7,01  | 3,06 | 0,43 | 1,86  | 15,75 | 2.465 | NS            |
|                          | Bajo costo       | 7,28  | 3,03 | 0,42 | 2,62  | 14,25 |       |               |
| Frecuencia central (kHz) | <i>Soundtrap</i> | 7,61  | 2,84 | 0,37 | 2,62  | 17,25 | 2.504 | NS            |
|                          | Bajo costo       | 7,55  | 2,91 | 0,38 | 3,19  | 15,75 |       |               |

contraron diferencias en la frecuencia pico de los silbidos obtenidos con ambos hidrófonos (Test de Wilcoxon,  $V = 1.566$ ;  $p > 0,05$ ) (Tabla 1). Se midieron otros parámetros como: Máx. frecuencia (kHz), Frecuencia más alta (kHz), Frecuencia más baja (kHz), PFC (corrección del factor de potencia) Mín. frecuencia (kHz), PFC Máx. frecuencia (kHz), Delta de frecuencia (kHz), Delta de tiempo (s), Pico de tiempo (s), Tiempo central (s), Tiempo 95% (s) y Tiempo 5% (s) que no fueron incluidos en el análisis comparativo por no ser considerados parámetros robustos (Apéndice, Tabla A1).

## DISCUSIÓN

El presente trabajo demostró que es posible detectar tanto pulsos como señales tonales de los delfines nariz de botella utilizando ambos hidrófonos (bajo costo y comercial). Dentro de la categoría pulsos se identificaron *clicks* de ecolocalización, mientras que las señales tonales encontradas fueron silbidos y *chirps*. Estudios previos realizados en mar abierto en Bahía La Paz (Baja California)

y en un oceanario de Riccione (Italia), también demostraron la posibilidad de detectar las señales acústicas de los delfines nariz de botella a partir de la utilización de hidrófono de bajo costo fabricados con piezoeléctricos (Romero y López 2010; De Marco et al. 2023). Aunque, a diferencia de estos trabajos, el presente estudio realiza una comparación estadística detallada sobre los parámetros de los silbidos registrados en ambos instrumentos con número elevado de silbidos.

Los delfines nariz de botella producen una gran diversidad de señales que han sido clasificadas con diferentes nomenclaturas a lo largo de los años (Herzing 2000). Principalmente se caracterizan por su amplio repertorio de silbidos, los cuales se los suele categorizar por su forma. En este caso, fue posible reconocer las formas estereotipadas generalmente reconocibles en esta especie, las cuales también fueron descritas por otros autores en diferentes oceanarios del mundo, como en Muroto, Kochi, Japón (Akiyama y Ohta 2007), Planète Sauvage Animal Park, Puerto Saint-Père, Francia (Lima 2017), y el Delfinario del Parque Astérix, Plailly Francia (López-Marulanda 2018), entre otros.

Por otro lado, los parámetros robustos medidos

no arrojaron diferencias significativas entre los instrumentos en estudio. En investigaciones previas, Romero y López (2010) reportaron que estos parámetros de los silbidos fueron exactamente iguales al comparar el instrumento de bajo costo con el comercial sobre dos especies de delfines (*Delphinus capensis* y *T. truncatus truncatus*). Sin embargo, estos autores realizaron el estudio sobre dos silbidos ( $n = 2$ ) por cada especie, mientras que en el presente trabajo se analizaron un total de 89 silbidos, siendo la primera evaluación donde se compara un número de silbidos tan elevado que da la posibilidad de realizar un análisis estadístico detallado. De esta manera, se deja evidencia de que no solo es posible detectar las señales acústicas de los delfines nariz de botella con hidrófonos de bajo costo, sino también de tener la posibilidad de obtener parámetros robustos confiables. Dichos parámetros son importantes como referencia al recolectar datos en mar abierto con el fin de intentar acercarse a la identificación de una especie por sus características acústicas.

Adicionalmente, se detectaron diferencias en las frecuencias de muestreo y en la resolución entre los medios de adquisición y almacenamiento del hidrófono comercial y el de bajo costo. La elección del tipo de hidrófono debe alinearse con los objetivos específicos de la investigación. Los hidrófonos de bajo costo, aunque presentan ciertas limitaciones, han demostrado ser herramientas útiles y versátiles en estudios donde la inversión en equipos de alta gama no es factible. En particular, el presente trabajo evidenció que estos dispositivos resultan eficaces para determinar la presencia del delfín nariz de botella, incluso en áreas específicas como oceanarios o ambientes controlados. Teniendo en cuenta eso, podrían ser eficaces para monitorear ritmos circadianos, evaluar la frecuencia de ocurrencia e incluso identificar individuos mediante silbidos firma. Además, el bajo costo de los materiales utilizados los hace especialmente apropiados para situaciones con alto riesgo de pérdida. La misma base funcional del hidrófono (dos sensores piezoeléctricos conectados a una grabadora) ha sido

previamente empleada para determinar el momento de ingreso de centolla a las redes de pesca, con la única diferencia de que en ese caso el sistema se encontraba encapsulado en una estructura estanca, también de bajo costo (Cabreira et al. 2015), y para detección de delfines nariz de botella en ambiente controlado (De Marco et al. 2023). Estos antecedentes, sumados a los resultados obtenidos en la detección de delfines nariz de botella, refuerza la validez y la eficacia de estos dispositivos accesibles, con un potencial de futura aplicación en estudios de mayor complejidad en el medio natural. En estos contextos, los hidrófonos de bajo costo permitirían recopilar información valiosa sobre la actividad acústica y la posible presencia de cetáceos, sentando las bases para futuros estudios sobre especies de difícil observación o estados de conservación vulnerable, como ocurre con el delfín liso austral (*Lissodelphis peronii*) o el delfín cruzado (*Lagenorhynchus cruciger*), o incluso especies que se encuentran con una categorización vulnerable como es el delfín franciscana (*Pontoporia blainvilliei*), el delfín chileno (*Cephalorhynchus eutropia*) o el delfín nariz de botella de Lahille (*T. truncatus geophyreus*) (UICN 2024). Esta última es una especie que dejó de registrarse la presencia de individuos para la década de los noventa en la Provincia de Buenos Aires (PBA), Argentina, lo que llevó a la conclusión de que habían desaparecido de la zona por causas aún desconocidas (Vermeulen et al. 2017). Actualmente, se reconoce una población al sur de la PBA, y se estima que la población de delfines nariz de botella de Lahille en la Argentina no supera los 200 ejemplares (Vermeulen et al. 2017, 2019). La baja densidad de esta especie hace que sea muy poco probable avistar grupos de animales en el mar, por lo que la eficacia de los hidrófonos de bajo costo sería una herramienta útil para la detección acústica y la evaluación de la presencia de *T. truncatus geophyreus* en el mar (Giardino datos no publicados). A pesar de las limitaciones del equipamiento en condiciones de mar abierto, contar con registros acústicos obtenidos en simultaneidad con la observación directa de los animales permiti-

ría validar que la especie detectada acústicamente efectivamente corresponde a la especie observada. Esta información resulta especialmente valiosa para estudios posteriores en los que el equipo permanece fondeado sin supervisión visual, ya que brinda una referencia confiable para la interpretación de los registros en ausencia de observación directa.

---

### AGRADECIMIENTOS

---

Este proyecto fue posible gracias a la colaboración del oceanario Aquarium Mar del Plata, Argentina, cuyos cuidadores de delfines hicieron posible coordinar y llevar a cabo el trabajo. También agradecemos a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) por la adquisición del hidrófono autocontenido SoundTrap utilizado en estudio. Contribución INIDEP N° 2440.

### Contribución de autores

Agustina C. Macchi: conceptualización; validación; análisis formal y curación de datos; redacción-borrador original; visualización. Bruno V. Menna: recursos; redacción-revisión y edición. Ariel G. Cabreira: recursos; redacción-revisión y edición. Diego H. Rodríguez: supervisión; adquisición de fondos. Alejandro Saubidet y Javier Olguin: cuidado de animales. Gisela V. Giardino: conceptualización; validación; redacción-revisión y edición; visualización; supervisión; adquisición de fondos.

---

### REFERENCIAS

---

- AKIYAMA J, OHTA M. 2007. Increased number of whistles of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, arising from interaction with people. J Vet Med Sci. 69 (2): 165-170.
- AU WWL. 1993. The sonar of dolphins. Nueva York: Springer-Verlag. p. 115-139.
- AU WWL, HASTINGS MC. 2008. Principles of marine bioacoustics. New York: Springer. 510: 502-509.
- BAZÚA-DURÁN C, AU WWL. 2002. The whistles of Hawaiian spinner dolphins. J Acoust Soc Am. 112 (6): 3064-3072.
- BERTA A, SUMICH JL, KOVACS KM. 2015. Sound Production for Communication, Echolocation, and Prey Capture. En: BERTA A, SUMICH JL, KOVACS KM, editores. Marine mammals. 3ra ed. San Diego: Academic Press. p. 345-395.
- BUSCAINO G, BUFFA G, FILICIOTTO F, MACCARONE V, DI STEFANO V, CERAULO M, ALONGE G. 2015. Pulsed signal properties of free-ranging bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) in the central Mediterranean Sea. Mar Mamm Sci. 31 (3): 891-901.
- CABREIRA AG, CAMPODÓNICO S, VILLALBA J. 2017. Passive acoustics for monitoring bottom contact of dredge. Proceedings of the 2017 IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics). IEEE. p. 1-3.
- CABREIRA AG, LÉRTORA P, WYNGAARD J, MADIROLAS A. 2015. Sound recordings of the Patagonian king crab (*Lithodes santolla*). Proceedings of the 2015 IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics). IEEE. p. 1-3.
- CARPENTER R, SILVIA M, CRAY BA. 2006. The design of a broadband ocean acoustic laboratory: detailed examination of vector sensor performance. Proceedings of the 8 Unattended Ground, Sea, and Air Sensor Technologies and Applications. SPIE. p. 180-190.
- CHARIF RA, WAACK AM, STRICKMAN LM. 2010. Raven Pro 1.4 user's manual. Ithaca: The Cornell Lab of Ornithology.
- CHARRIER I, HUETZ C, PREVOST L, DENDRINOS P, KARAMANLIDIS AA. 2023. First description of the underwater sounds in the Mediterranean monk seal *Monachus monachus* in Greece: to-

AKIYAMA J, OHTA M. 2007. Increased number of whistles of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, arising from interaction with people. J

- wards establishing a vocal repertoire. *Animals*. 13 (6): 1048.
- CLAUSEN KT, WAHLBERG M, BEEDHOLM K, DERUITE S, MADSEN PT. 2011. Click communication in harbour porpoises *Phocoena phocoena*. *Bioacoustics*. 20 (1): 1-28.
- COCHRAN JC. 2022. Introduction to sonar transducer design. Oxford: Wiley. 544 p.
- DE MARCO R, DI NARDO F, LUCCHETTI A, VIRGILI M, PETETTA A, LI VELI D, SCARADOZZI D. 2023. The development of a low-cost hydrophone for passive acoustic monitoring of dolphin's vocalizations. *Remote Sens*. 15 (7): 1946.
- ERBE C, DUNCAN A, VIGNESS-RAPOSA KJ. 2022. Introduction to sound propagation underwater. En: ERBE C, THOMAS JA, editores. *Exploring animal behavior through sound*. Vol. 1. Methods. Cham: Springer. p. 185-216.
- GIARDINO GV, COSENTINO M, MACCHI AC, LOUREIRO JP, HEREDIA SR, ALVAREZ KC, RODRIGUEZ DH. 2024. Detailed comparison of acoustic signals from rehabilitated and wild franciscanas (*Pontoporia blainvillei*) dolphins. *Animals*. 14 (16): 2436.
- GORDON J, TYACK PL. 2001. Acoustic techniques for studying cetaceans. En: EVANS PGH, RAGA JA, editores. *Marine mammals: biology and conservation*. Nueva York: Springer. p. 293-324.
- HARDER JH, HILL HM, DUDZINSKI KM, SANABRIA KT, GUARINO S, KUCZAJ I, STAN A. 2016. The development of echolocation in bottlenose dolphins. *Int J Comp Psychol*. 29 (1): 181-200.
- HAWKES M, NEHORAI A. 1998. Acoustic vector-sensor beamforming and Capon direction estimation. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 46 (9): 2291-2304.
- HERZING DL. 2000. Acoustics and social behavior of wild dolphins: implications for a sound society. En: AU WWL, FAY RR, POPPER AN, editores. *Hearing by whales and dolphins*. New York: Springer. p. 225-272.
- HICKEY R, BERROW S, GOOLD J. 2009. Towards a bottlenose dolphin whistle ethogram from the Shannon Estuary, Ireland. *Biol Environ Proc Royal Irish Acad*. 109 B (2): 89-94.
- JANIK VM, SAYIGH LS. 2013. Communication in bottlenose dolphins: 50 years of signature whistle research. *J Comp Physiol A*. 199: 479-489.
- JONES B, ZAPETIS M, SAMUELSON M, RIDWAY S. 2020. Sounds produced by bottlenose dolphins (*Tursiops*): a review of the defining characteristics and acoustic criteria of the dolphin vocal repertoire. *Bioacoustics*. 29 (4): 399-440.
- LIMA ADM. 2017. Production and perception of acoustic signals in captive bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*): contextual use of social signals and recognition of artificial labels [tesis doctoral]. Rennes: Universidad de Rennes.
- LÓPEZ-MARULANDA JL. 2018. Acoustic Communication and Social Behavior in Bottlenose Dolphins (*Tursiops truncatus*) [tesis doctoral]. Gif-sur-Yvette: Université Paris Saclay (COMUE).
- MACCHI A. 2024. Caracterización sonora contextual de los delfines nariz de botella (*Tursiops truncatus*) en un ambiente controlado en Mar del Plata (Argentina) [tesis de licenciatura]. Mar del Plata: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata.
- MELLINGER DK, STAFFORD KM, MOORE SE, DZIAK RP, MATSUMOTO H. 2007. An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography*. 20 (4): 36-45.
- PACE DS, PULCINI M, TRIOSI F. 2012. Anthropogenic food patches and association patterns of *Tursiops truncatus* at Lampedusa island, Italy. *Behav Ecol*. 23 (2): 254-264.
- POSIT SOFTWARE PBC. 2024. RStudio: integrated development environment for R. Version 2024.04.1 Build 748. [consultado julio 2024]. Boston: Posit. <https://posit.co/>.
- ROMERO VIVAS E, LEÓN-LÓPEZ B. 2010. Construction, calibration, and field test of a home-made, low-cost hydrophone system for cetacean acoustic research. *J Acoust Soc Am*. 128: 2438.
- SANTOS MED, LOURO S, COUCHINHO MN, BRITO CM. 2005. Whistles of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) in the Sado Estuary, Portugal: characteristics, production rates, and

- long-term contour stability. *Aquat mamm.* 31: 453-462.
- SAHEBAN H, KORDROSTAMI Z. 2021. Hydrophones, fundamental features, design considerations, and various structures: a review. *Sensors Actuators A Phys.* 329: 112790.
- SHAHBABA B. 2012. *Biostatistics with R: an introduction to statistics through biological data*. [consultado julio 2024]. Nueva York: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1302-8>
- SUEUR J, AUBIN T, SIMONIS C. 2008. Seewave, a free modular tool for sound analysis and synthesis. *Bioacoustics.* 18 (2): 213-226.
- TERADA T, MORISAKA T, WAKABAYASHI I, YOSHIOKA M. 2022. Communication sounds produced by captive narrow-ridged finless porpoises (*Neophocaena asiaeorientalis*). *J Ethol.* 40 (3): 245-256.
- [IUCN] UNIÓN INTERNACIONAL PARA LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA. 2024. Lista roja de especies amenazadas: actualización de octubre de 2024. <https://www.iucnredlist.org/>.
- URICK RJ. 1983. *Principles of underwater sound*. 3ra ed. Nueva York: McGraw-Hill. 423 p.
- VERMEULEN E, BASTIDA R, BERNINSONE LG, BORDINO P, FAILLA M, FRUET P, HARRIS G, IÑÍGUEZ M, MARCHESI MC, PETRACCI P, et al. 2017. A review on the distribution, abundance, residency, survival and population structure of coastal bottlenose dolphins in Argentina. *Lat Am J Aquat Mamm.* 12 (1-2): 2-16.
- VERMEULEN E, FRUET P, COSTA A, COSCARELLA M, LAPORTA P. 2019. *Tursiops truncatus* ssp. *gephyreus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2019: e.T134822416A135190824. DOI: <https://doi.org/10.2305/iucn.uk.2019-3.rlts.t134822416a135190824.en>

## APÉNDICE

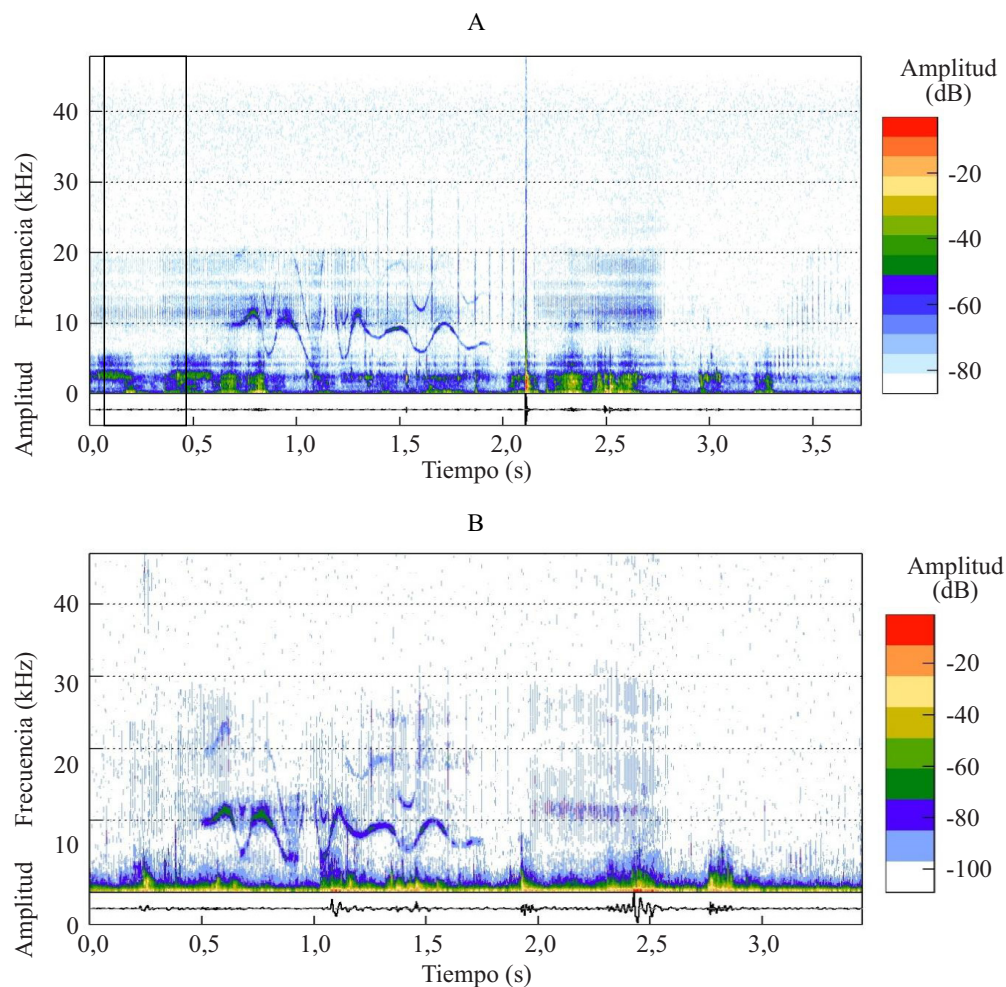


Figura A1. Ejemplo de comparación de señales acústicas entre el hidrófono de bajo costo (A) y otro comercial (B) registrados de los delfines nariz de botella de Aquarium Mar del Plata, Argentina. Espectrograma ajustado para mejor visualización de los silbidos a 46 kHz, Hann con tamaño de ventana 512, DFT size: 512, 50% de solapamiento (*overlap*).

Figure A1. Example of acoustic signal comparison between the low-cost hydrophone (A) and a commercial one (B) recorded from bottlenose dolphins at Aquarium Mar del Plata, Argentina. Spectrogram adjusted for better visualization of the whistles at 46 kHz, Hann with advantage size 512, DFT size: 512, 50% overlap.

Se encontraron diferencias significativas entre los instrumentos en estudio para los siguientes parámetros: frecuencias más bajas (kHz) y las más altas (kHz) (Test de Wilcoxon,  $V = 1.192$ ; valor- $P < 0,05$ ; Test de Wilcoxon,  $V = 3.506$ , valor- $P < 0,05$ ).

También, en el delta de frecuencia (kHz) (Test de Wilcoxon,  $V = 3,437$ ; valor- $P < 0,05$ ), PFC Máx. frecuencia (kHz) (Test de Wilcoxon,  $V = 2.817$ ; valor- $P < 0,05$ ) y delta de tiempo (kHz) (Test de Wilcoxon,  $V = 3.188$ ; valor- $P < 0,05$ ).

Tabla A1. Parámetros de los silbidos para los equipos *Soundtrap* y de bajo costo a partir de los registros obtenidos de los delfines nariz de botella de Aquarium Mar del Plata. DS = desvío estándar; CV = coeficiente de variación; Mín. = mínimo valor observado; Máx. = máximo valor observado; V = valor de Test de Wilcoxon para muestras apareadas. Significancia = NS (no significancia).

Table A1. Whistle parameters for *Soundtrap* and low-cost equipment based on recordings from bottlenose dolphins at Aquarium Mar del Plata. DS = standard deviation; CV = coefficient of variation; Mín. = minimum observed value; Máx. = maximum observed value; V = Wilcoxon paired-samples test value. Significancia = significance, NS (not significant).

| Parámetros                | Hidrófono        | Media   | DS       | CV   | Mín.  | Máx.     | V       | Significancia |
|---------------------------|------------------|---------|----------|------|-------|----------|---------|---------------|
| Máxima frecuencia (kHz)   | <i>Soundtrap</i> | 6,90    | 2,95     | 0,41 | 1,87  | 14,75    | 1.566   | NS            |
|                           | Bajo costo       | 7,27    | 2,96     | 0,41 | 2,62  | 14,25    |         |               |
| Pico de tiempo (s)        | <i>Soundtrap</i> | 425,63  | 361,92   | 0,85 | 0,005 | 1.163,4  | 1.602   | NS            |
|                           | Bajo costo       | 724,31  | 429,26   | 0,59 | 0,04  | 1.873,8  |         |               |
| Tiempo 5% (kHz)           | <i>Soundtrap</i> | 425,42  | 361,90   | 0,85 | 5,54  | 1.163,4  | 2.465   | NS            |
|                           | Bajo costo       | 724,13  | 429,26   | 0,59 | 38,29 | 1.873,8  |         |               |
| Tiempo 95% (kHz)          | <i>Soundtrap</i> | 514,78  | 1.026,31 | 1,99 | 5,613 | 10.500   | 2.504   | NS            |
|                           | Bajo costo       | 722,71  | 661,23   | 0,85 | 39,22 | 6.000    |         |               |
| Tiempo central (s)        | <i>Soundtrap</i> | 406, 85 | 342,98   | 0,84 | 5,60  | 1.162,74 | 1.597   | NS            |
|                           | Bajo costo       | 736,71  | 449,82   | 0,61 | 38,50 | 1.874,19 |         |               |
| Delta de frecuencia (kHz) | <i>Soundtrap</i> | 8,95    | 3,99     | 0,44 | 3,80  | 20,57    | 3.437   | S             |
|                           | Bajo costo       | 7,04    | 2,76     | 0,39 | 2,39  | 20,57    |         |               |
| Delta de tiempo (s)       | <i>Soundtrap</i> | 0,64    | 0,36     | 0,57 | 0,02  | 2,63     | 3.188   | S             |
|                           | Bajo costo       | 0,55    | 0,29     | 0,52 | 0,02  | 1,59     |         |               |
| Frecuencia más alta (kHz) | <i>Soundtrap</i> | 11,94   | 3,24     | 0,27 | 6,37  | 22,27    | 3.506   | S             |
|                           | Bajo costo       | 13,63   | 4,62     | 0,34 | 7,03  | 29,91    |         |               |
| Frecuencia más baja (kHz) | <i>Soundtrap</i> | 7,61    | 2,84     | 0,37 | 2,62  | 17,25    | 1.192   | S             |
|                           | Bajo costo       | 7,55    | 2,91     | 0,38 | 3,19  | 15,75    |         |               |
| PFC Máx. frecuencia (kHz) | <i>Soundtrap</i> | 13,18   | 4,59     | 0,35 | 6,75  | 15       | 2.817   | S             |
|                           | Bajo costo       | 11,71   | 3,23     | 0,27 | 6,19  | 13,69    |         |               |
| PFC Mín. frecuencia (kHz) | <i>Soundtrap</i> | 4,94    | 1,76     | 0,35 | 1,87  | 11,25    | 1.249,5 | NS            |
|                           | Bajo costo       | 5,13    | 1,92     | 0,37 | 2,62  | 12,37    |         |               |

