Impacto del ruido antropogénico en el espacio de comunicación de las ballenas azul y fin, en la zona de la Reserva Marina Isla Chañaral (RMICH), Chile centro-norte.

Tesis

Entregada a La

Universidad de Valparaíso

En Cumplimiento Parcial De Los Requisitos

Para Optar Al Grado De

Magister en Ciencias Biológicas Mención Biodiversidad y Conservación

Instituto de Biología

Facultad De Ciencias

Por

Giselle Valentina Alosilla Vargas

Julio, 2024

Director de Tesis:

Dra. María José Pérez Álvarez

INSTITUTO DE BIOLOGIA

FACULTAD DE CIENCIAS

UNIVERSIDAD DE VALPARAISO

INFORME DE APROBACION
TESIS DE MAGISTER

Se informa a la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ciencias que la Tesis de Magister presentada por el candidato.

GISELLE VALENTINA ALOSILLA VARGAS

Ha sido aprobada por la comisión de Evaluación de la tesis como requisito para optar al grado de Magister en Ciencias Biológicas mención Biodiversidad y Conservación, en el examen de Defensa de Tesis rendido el día 28 de Agosto de 2024.

Directores de Tesis:

Prof.	Dra. María José Pérez-Álvarez……..
Prof.	Dra. Susannah Buchan ……..
Prof.	Dr. Alfio Yori…….….

Comisión de Evaluación de la Tesis:

Prof.	Dra. María José Pérez-Álvarez……..
Prof.	Dra. Susannah Buchan ……..
Prof.	Dr. Alfio Yori…….….
Prof.	Dr. Carlos Olavarría……..….

Dedicatoria:

A mis padres, Bernardita y Omar, quienes nunca han dejado de creer en el camino que he tomado. A mi familia y a mis amigos por escucharme en cada momento. Por último, este trabajo está dedicado a mi hermana Millaray, mis ojos chinitos, para que nunca dejes de decir que tu hermana estudia animales del mar.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, en primera instancia a mis profesores guías, Susi, Jose y Alfio, quienes fueron un pilar fundamental en el desarrollo de este trabajo, por no dudar en mis capacidades, por ser parte de esta aventura y las palabras de aliento. Por su apoyo y guía en este tema muy interesante y donde puse a prueba cada gramo de mi ser para superar el desafío.

Quiero agradecer profundamente a Matías Muñoz, quien me ayudó a adaptar el detector automático para mis análisis y a Laura Gutiérrez que fue clave con su ayuda para la ejecución de los modelos usados en este trabajo, sin ti nunca hubiera podido avanzar. Gracias por la paciencia.

Quiero agradecer también a LECMMAR, el mejor equipo de trabajo, gracias por escuchar cada queja y lamento que pude tener.

Quiero agradecer a mi mejor amiga, Aly, que sin saber de lo que le hablaba siempre escucho mis parloteos.

Y, por último, pero no menos importante, a mi familia quienes fueron el pilar más importante para terminar esta tesis. Sin su apoyo nunca podría hacer todo lo que se me ocurra.

Muchas gracias a todos, mejoro cada día con su ayuda.

INDICE DE CONTENIDOS

I INTRODUCCION 14

1. El sonido en el océano 14

2. La comunicación en el océano 17

3. La comunicación en los cetáceos 17

4. Impacto del ruido submarino en los cetáceos 19

5. El Archipiélago de Humboldt 22

6. Hipótesis 24

II METODOLOGIA 25

1. Área de estudio 25

2. Recopilación de la información acústica 25

3. Caracterización del paisaje acústico. 27

3.1. Identificación de sonidos biológicos en aguas adyacentes a la Isla Chañaral. 28

3.1.1. Señales acústicas de la ballena Azul (*B. musculus*). 28

3.1.2. Señales acústicas de la ballena Fin (*B. physalus*) 30

3.1.3. Análisis estadístico sonidos biológicos 31

3.2. Caracterización y análisis de sonidos antropogénicos en aguas adyacentes a la Isla Chañaral. 32

3.3. Caracterización y análisis del sonido ambiental en las aguas adyacentes a la Isla Chañaral. 34

3.4. **Estimación del Rango de Comunicación (CR) y Espacio de Comunicación (CS) de las ballenas en aguas adyacentes a la Isla Chañaral.** 37

3.4.1. Evaluación de efecto del sonido antropogénico en el rango de comunicación de las ballenas en aguas adyacentes a la Isla Chañaral. 41

III. RESULTADOS 43

1. Caracterización biológica en aguas adyacentes a la Isla Chañaral. 43

1.1. Ballena azul 43

1.1.1. Señal SEP2 43

1.1.2. Señal Dcall 46

1.2. Ballena fin 48

1.2.1. Señal 20 Hz 48

1.2.2. Señal Downsweep (Ds) 51

2. Caracterización del ruido antropogénico en aguas adyacentes a la Isla Chañaral. 53

3. Caracterización del sonido ambiente en aguas adyacentes a la Isla Chañaral. 58

4. Estimación Espacio de Comunicación de las ballenas y el impacto del ruido antropogénico las aguas adyacentes a la Isla Chañaral. 61

4.1. Estimación del Espacio de Comunicación (CS) e impacto para la ballena azul. 61

4.2. Estimación del espacio de comunicación (CS) e impacto para la ballena fin. 70

IV. DISCUSION 78

1. La presencia de las ballenas en aguas adyacentes a la Isla Chañaral, Archipiélago de Humboldt 78

2. El ruido antropogénico en aguas adyacentes a la Isla Chañaral, en el Archipiélago de Humboldt 80

3. La dinámica del sonido ambiente natural y antropogénico en aguas adyacentes a la Isla Chañaral, Archipiélago de Humboldt. 82

4. El ruido antropogénico y su impacto en el espacio de comunicación de las ballenas en aguas adyacentes a la Reserva Marina Isla Chañaral, Archipiélago de Humboldt 84

5. Aporte de este estudio para la conservación de las especies y el manejo de la nueva área marina costera protegida archipiélago de Humboldt (AMCP-MU) 86

6. Fortalezas y limitaciones de este estudio 87

7. Trabajo científico a futuro 89

V. CONCLUSIONES 91

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 92

VII. ANEXOS 114

RESUMEN

La interacción entre individuos es fundamental en las diferentes fases del ciclo de vida como alimentación, sociabilización, reproducción y evasión de depredadores. El medio facilita la propagación del sonido, por lo que los mamíferos marinos, particularmente los cetáceos que se han adaptado a este medio son especies altamente vocales. Diversas fuentes de sonidos pueden alterar la comunicación entre individuos, siendo el el ruido antropogénico, generado por actividades como la construcción costera, el funcionamiento de puertos y el tránsito marítimo, unos de las principales fuentes de interferencia.

La Reserva Marina Isla Chañaral, es una zona rica en biodiversidad frecuentada por ballenas fin (*Balaenoptera physalus*) y ballenas azules (*B. musculus*). Estas son focos de actividades de turismo, las que se realizan desde embarcaciones menores, incrementando el nivel de ruido antropogénico. El presente trabajo se enfoca en evaluar el impacto del ruido de origen antropogénico producido por embarcaciones menores en el espacio de comunicación de las ballenas azul y fin en el área aledaña a la Reserva Marina Isla Chañaral considerando como hipótesis que el ruido originado por embarcaciones menores, impacta la comunicación de estos cetáceos en el área. De esta manera se predice que al aumentar este ruido antropogénico en el área de estudio se reduce el espacio de comunicación de las ballenas. Para ello se (1) caracterizaron los sonidos biológicos, antropogénicos y ambientales, (2) estimó el espacio de comunicación con y sin ruido antropogénico, y (3) evaluó el impacto del ruido de embarcaciones menores.

Se analizaron datos de un hidrófono anclado desde diciembre de 2017 hasta marzo de 2019. Los datos acústicos fueron clasificados en tres temporadas: verano, otoño e invierno austral. Identificando manualmente las vocalizaciones SEP2 y Dcall de la ballena azul, 20 Hz y Downsweep de la ballena fin. Se identificó el ruido antropogénico, estimando su presencia anual y temporal. Se separaron los archivos en tres categorías: (1) Natural libre de sonido antropogénico, (2) Antropogénico y (3) Máximo nivel registrado. El sonido ambiental se estimó usando niveles de intensidad (SPL) con PAMGuide en MATLAB para las tres categorías. La estimación del espacio de comunicación se realizó con el Modelo RAM y la Ecuación pasiva del sonar, considerando métricas de vocalizaciones, sonido ambiente, nivel de fuente de sonido,

velocidad del sonido y batimetría. Esto permitió obtener el rango de comunicación (km) y extrapolarlo al espacio de comunicación (km²). Se evaluó el impacto del ruido antropogénico estimando la reducción espacial en los escenarios natural-antropogénico y natural-antropogénico máximo nivel registrado.

Los resultados indicaron la presencia de ambas especies de ballenas en el área de estudio. La ballena azul mostró una marcada estacionalidad, con mayores registros de vocalizaciones en verano. La ballena fin presentó vocalizaciones Downsweep (asociadas a alimentación) en verano y otoño, y 20 Hz (asociadas a reproducción) en invierno. El ruido antropogénico se detectó durante todo el año, con mayor intensidad en verano y en horas diurnas (6:00 a 17:00 h). El espacio de comunicación para las señales asociadas a reproducción en condiciones naturales fue amplio (>100 km²) para SEP2 y 20 Hz, y menor (<10 km²) para las señales de contacto (Dcall y Downsweep). El ruido antropogénico redujo el espacio de comunicación entre un 10 y 50% en verano e invierno para las señales de contacto, y en invierno para las señales de reproducción. En el escenario de máximo nivel registrado, todas las vocalizaciones se redujeron entre un 99 y 100%.

La presencia de las especies de ballenas, identificada mediante herramientas acústicas, es coherente con registros previos en el área, reforzando la presencia de actividades de alimentación en verano para ambas especies. Acústicamente se registran vocalizaciones asociadas de reproducción, emitidas por machos, en verano para la ballena azul e invierno para la ballena fin. La presencia de ruido antropogénico registrado tiene relación con las actividades económicas locales diurnas atribuibles a turismo en verano y de extracción de recursos el resto del año. Los resultados muestran que el ruido antropogénico impacta el espacio de comunicación de las ballenas en el área de estudio, sobre todo en el máximo nivel registrado, donde el espacio de comunicación se reduce entre un 99 al 100%. Esto es particularmente importante dado la pérdida o disminución de la comunicación entre individuos pudiendo afectar el encuentro de los individuos. Por otro lado, el impacto en las señales asociadas a alimentación puede interferir en sus actividades de forrajeo disminuyendo el desarrollo de esta actividad en el área, y potencialmente, pudiendo propiciar el abandono del área de estudio.

A modo de conclusión, el presente estudio reafirma que el uso de herramientas acústicas permite registrar la presencia de misticetos e inferir conductas de algunos individuos. Los resultados muestran, de manera concordante a la hipótesis planteada, que el ruido antropogénico registrado producto de embarcaciones menores, disminuye el espacio de comunicación de las ballenas, lo cual sugiere potenciales consecuencias en actividades, principalmente en alimentación Así el turismo de observación no regulado y sobre todo la apertura de nuevos puertos con tráfico de grandes embarcaciones, podría afectar el uso de área y permanencia de las ballenas en el sector con su consecuente impacto en la conservación de estas especies. Este estudio es uno de los primeros que estima el impacto del ruido antropogénico de embarcaciones en esta zona. Se recomienda optimizar el diseño de levantamiento de información acústica con la finalidad de mantener un monitoreo complementario en el tiempo que permita identificar el efecto del impacto antropogénico considerando, por ejemplo, distintas distancias de acercamiento, velocidad de acercamiento y distintos números de embarcaciones presentes a la vez. Así mismo, se sugiere la evaluación de medidas de mitigación del impacto como implementar reducción de horas de ingreso, delimitar rutas de navegación y/o delimitar velocidad de navegación, contribuyendo en líneas de acción directas para la conservación de los cetáceos.

ABSTRACT

The interaction between individuals is fundamental in various phases of the life cycle, such as feeding, socializing, reproduction, and predator avoidance. The environment facilitates the propagation of sound, making marine mammals, particularly cetaceans that have adapted to this medium, highly vocal species. Various sources of sound can disrupt communication between individuals, with anthropogenic noise, generated by activities like coastal construction, port operations, and maritime traffic, being among the main sources of interference.

The Isla Chañaral Marine Reserve is a biodiversity-rich area frequented by fin whales (Balaenoptera physalus) and blue whales (B. musculus). These species are the focus of tourism activities conducted from small vessels, which increase the level of anthropogenic noise. This study focuses on assessing the impact of anthropogenic noise from small vessels on the communication space of blue and fin whales in the area surrounding the Isla Chañaral Marine Reserve, hypothesizing that noise generated by small vessels impacts the communication of these cetaceans in the area. It is predicted that as this anthropogenic noise increases in the study area, the communication space of the whales decreases. To address this, the study (1) characterized biological, anthropogenic, and environmental sounds, (2) estimated the communication space with and without anthropogenic noise, and (3) evaluated the impact of noise from small vessels.

Data from an anchored hydrophone, collected from December 2017 to March 2019, were analyzed. The acoustic data were classified into three seasons: summer, autumn, and austral

winter. Blue whale SEP2 and Dcall vocalizations, and fin whale 20 Hz and Downsweep vocalizations were manually identified. Anthropogenic noise was identified, and its annual and temporal presence was estimated. The files were separated into three categories: (1) Natural, free of anthropogenic sound, (2) Anthropogenic, and (3) Maximum recorded level. Ambient sound was estimated using intensity levels (SPL) with PAMGuide in MATLAB for the three categories. The communication space was estimated using the RAM Model and the passive sonar equation, considering vocalization metrics, ambient sound, sound source level, sound speed, and bathymetry. This allowed the communication range (km) to be obtained and extrapolated to the communication space (km^2). The impact of anthropogenic noise was evaluated by estimating spatial reduction in the natural-anthropogenic and natural-anthropogenic maximum recorded level scenarios.

The results indicated the presence of both whale species in the study area. The blue whale showed marked seasonality, with higher vocalization records in summer. The fin whale presented Downsweep vocalizations (associated with feeding) in summer and autumn, and 20 Hz vocalizations (associated with reproduction) in winter. Anthropogenic noise was detected year-round, with greater intensity in summer and during daytime hours (6:00 to 17:00 h). The communication space for signals associated with reproduction under natural conditions was large (>100 km^2) for SEP2 and 20 Hz, and smaller (<10 km^2) for contact signals (Dcall and Downsweep). Anthropogenic noise reduced the communication space by 10 to 50% in summer and winter for contact signals, and in winter for reproductive signals. In the maximum recorded level scenario, all vocalizations were reduced by 99 to 100%.

The presence of whale species identified through acoustic tools is consistent with previous records in the area, reinforcing the presence of feeding activities in summer for both species. Acoustically, vocalizations associated with reproduction, emitted by males, were recorded in summer for the blue whale and winter for the fin whale. The recorded anthropogenic noise is related to local daytime economic activities, attributable to tourism in summer and resource extraction during the rest of the year. The results show that anthropogenic noise impacts the communication space of whales in the study area, especially at the maximum recorded level, where the communication space is reduced by 99 to 100%. This is particularly important given the potential loss or reduction of communication between individuals, which could affect encounters between individuals. Furthermore, the impact on signals associated with feeding may interfere with their foraging activities, reducing the development of this activity in the area and potentially leading to the abandonment of the study area.

In conclusion, this study reaffirms that the use of acoustic tools allows for the detection of mysticete presence and the inference of certain individual behaviors. The results align with the hypothesis, showing that anthropogenic noise from small vessels reduces the communication space of whales, suggesting potential consequences for activities, primarily feeding. Therefore, unregulated whale-watching tourism and the potential opening of new ports with large vessel traffic could affect the use of the area and the whales' permanence, with consequent impacts on the conservation of these species. This study is one of the first to estimate the impact of anthropogenic noise from vessels in this area. It is recommended to optimize the design of acoustic information collection to maintain complementary monitoring over time, enabling the identification of the impact of anthropogenic noise considering, for example, different approach

distances, approach speeds, and different numbers of vessels present at the same time. Additionally, evaluating mitigation measures such as implementing restricted entry hours, delineating navigation routes, and/or limiting navigation speed is suggested, contributing to direct conservation actions for cetaceans.

I INTRODUCCION

La comunicación acústica es esencial para la supervivencia y el comportamiento de muchas especies marinas. En mamíferos marinos, la transmisión de sonidos es crucial para una variedad de funciones vitales, incluyendo la localización de presas, la navegación, la socialización, la evitación de depredadores y la reproducción (Tyack, 2000, 2008). El medio acuático presenta grandes beneficios para la transmisión de las señales acústicas, que interactúan en la comunicación, como la mejor propagación del sonido al ser un medio denso y tener una mayor velocidad del sonido que el aire (Ainslie, 2009; Bass & Clark, 2003) Además, el agua tiene una menor atenuación del sonido, lo que significa que las ondas sonoras pueden viajar distancias considerablemente mayores sin perder intensidad significativa (Jensen et al., 2011). Estos factores permiten que las señales acústicas se transmitan de manera más eficiente y a mayores distancias bajo el agua en comparación con el aire (Au & Hastings, 2008; Montgomery & Radford, 2017).

1. El sonido en el océano

El sonido es la señal sensorial que más rápido de propaga en el océano y que es usada por los mamíferos marinos para interpretar y explorar el ambiente marino, interactuar con él y con otros individuos y especies (Duarte *et al.* 2021). El sonido es contribuido desde distintas fuentes, ya sea natural o no natural (Erbe & Thomas, 2022), donde encontramos las fuentes geofísicas (geofonía), biológicas (biofonía) y de origen humano o antropogénicas (antropofonía) (Pijanowski *et al.* 2011; Duarte *et al.* 2021). La geofonía corresponde a la categoría de sonidos producidos por fuentes naturales no biológicas, generado por el viento, agua, clima y actividades geofísicas como la actividad sísmica y volcánica (Krause 2008).

La biofonía es la categoría de sonidos producidos por fuentes biológicas, emitidas desde la micro a la macrofauna, y donde se incluye la comunicación animal que considera la producción de vocalizaciones (Krause 2008). Los animales marinos son capaces de emitir o reconocer una amplia gama de sonidos (Duarte *et al.* 2021) (Fig. 1A y 1B), donde cada especie o grupo taxonómico utiliza una o más bandas de frecuencia donde emite sonidos para algún propósito. Finalmente, la antropofonía corresponde a la categoría de sonidos no naturales generado por las

actividades humanas, incluyendo el uso de su tecnología (Krause, 2008), comúnmente llamado ruido antropogénico. Dentro de la generación de ruido antropogénico destacan los producidos por los sonares, prospecciones sísmicas, explosiones químicas y nucleares, las actividades industriales y construcciones en zonas marítimas y costeras, y el producido por las embarcaciones (Hildebrand, 2004, 2009; Ross, 2005; Yori, 2018; Yori, 2023). El ruido de origen antropogénico abarca un amplio espectro de frecuencias desde bandas de baja frecuencia a altas frecuencias (Fig. 1C).

La presencia del ruido antropogénico en el ambiente marino trae consigo una serie de efectos negativos a las especies, entre ellos se puede afectar a la reproducción, el encuentro, la condición corporal, malformaciones, cambios conductuales, el estrés, daño temporal o permanente e incluso la muerte (Aguilar De Soto et al., 2012; Aguilar Soto et al., 2006; Brandt et al., 2011; Cox et al., 2005; De Jong et al., 2020; B. S. Miller et al., 2021; P. J. O. Miller et al., 2000; Mooney et al., 2009; Popper et al., 2003; Radford et al., 2014; Rolland et al., 2012; Simonis et al., 2020). Por otro lado, afecta a la comunicación al producir un efecto de enmascaramiento de las señales biológicas por la interferencia en la propagación de estas señales por parte del ruido antropogénico (Clark et al., 2009).

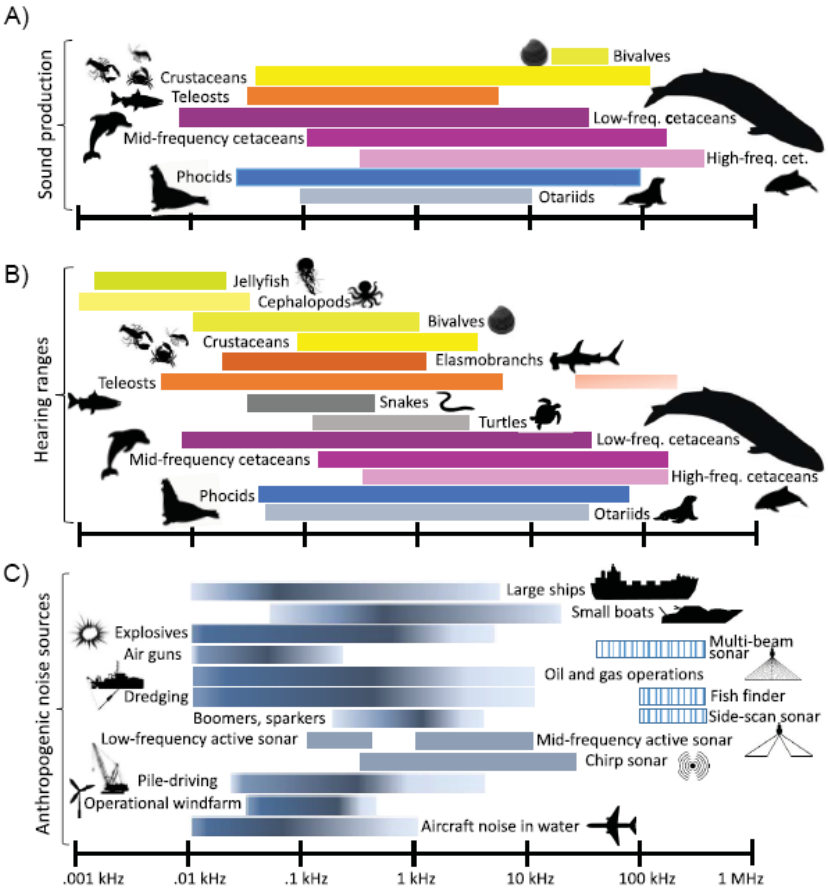


Figura 1. Fuentes y receptores de ruido presentes en el paisaje acústico marino. (A) Rango de frecuencia de fuentes bióticas de ruido. (B) Rango de frecuencia de audición de especies marinas. (C) Rango de frecuencia de fuentes antropogénicas de ruido. Extraído de Duarte et al. (2021).

2. La comunicación en el océano

La comunicación es una característica fundamental para la supervivencia de cualquier especie. Aunque la definición de comunicación puede variar dependiendo del contexto, área de estudio o autor (Scott-Phillips, 2008), principalmente se refiere a una interacción entre un emisor y un receptor. El emisor envía una señal o mensaje con la intención de comunicar, y el receptor recibe y decodifica la señal para comprender el mensaje transmitido (Cobley, 2008; Scott-Phillips, 2008). Esta señal puede estar relacionada con diversos contextos, tales como la sociabilización, la alimentación, la reproducción y el cuidado parental, entre otros.

Dentro de las complejidades de la comunicación podemos distinguir dos categorías fundamentales: la comunicación acústica y la comunicación no acústica. Así mismo, dentro de la comunicación acústica podemos diferenciar en dos subgrupos, vocal y no vocal. La comunicación vocal se caracteriza por emplear prácticas sonoras que abarcan desde la producción hasta la percepción, el aprendizaje y el significado del sonido (Janik, 2014), un fenómeno comúnmente conocido como vocalización. Por otro lado, la comunicación acústica no vocal engloba una variedad de sonidos distintos, como aquellos generados por las aletas, golpes de aletas, chasquidos, o incluso el rechinar de dientes (Dudzinski et al., 2009; Moreno & Macgregor, 2019).

En la comunicación no acústica podemos encontrar otras formas de interacción, donde encontramos una forma química, física o visual (Pryor 1990), la comunicación no acústica es útil cuando los individuos quieren comunicarse, pero no quieren alertar a presas o depredadores (Würsig et al., 1990).

3. La comunicación en los cetáceos

Los cetáceos se comunican entre sí de diversas formas, cada una especie con su propia complejidad asociado a conductas de sociabilización, reproducción, alimentación y depredación (Pryor 1990).

Dentro de las comunicaciones no acústica, la comunicación visual incluye a las posturas corporales, golpes con colas o aletas, distinción por patrones de colores o heridas que sirven para comunicarse entre un grupo o con otros (Dudzinski et al., 2009). Esta comunicación está limitada por factores, como claridad del agua, luminosidad del ambiente y el sentido de la vista de los individuos (Mobley & Helweg, 1990). La comunicación táctil se da cuando entre individuos de una misma especie mediante el tacto entre aletas se comunican con otros para posiblemente crear grupos afectivos o para reproducción (Dudzinski et al., 2010). Es común que entre especies como delfines presenten un contacto entre ellos constantemente, se acicalan, frotan sus cuerpos o aletas llegando incluso a morderse entre sí (Pryor 1990). La comunicación química es reducida en los cetáceos debido al habitar en el océano, pero se ha identificado el uso de feromonas en especies de delfines macho para atraer hembras fértiles (Tyack, 2000).

Dentro de la comunicación acústica vocal en cetáceos se pueden clasificar silbidos tonales, pulsos, gemidos, clicks, vocalizaciones y cantos los que varían en intensidad y duración según el fin comunicativo, que son emitidos tanto por odontocetos y misticetos. Para una comunicación acústica no vocal se puede encontrar el uso de burbujas, el ruido producido por las aletas, golpes de aletas, chasquidos o rechinar de dientes (Dudzinski et al., 2009; Moreno & Macgregor, 2019).

En odontocetos se presenta una gama de sonidos, que abarca entre silbidos, ráfagas de pulsos, y clicks para comunicarse entre los individuos de un grupo para conductas de forrajeo y alimentación, reproducción o evitar predadores (Aguilar De Soto et al., 2012; Azevedo et al., 2010; Morisaka, 2012). La ecolocación en delfines es un tipo de comunicación acústico no verbal en base a clicks de alta frecuencia que se usa principalmente para navegación y forrajeo y que puede variar en duración y frecuencia según la especie y las condiciones de vida (Akamatsu et al., 1998; Madsen et al., 2023). Por otro lado, la ráfaga de pulsos es producida por todos los cetáceos dentados, se caracteriza por ser un tren de pulsos repetitivos durante un periodo de tiempo que varía en la tasa de repetición e intervalo entre pulsos (Arranz et al., 2016; Dudzinski et al., 2009). Los silbidos tonales corresponden a silbidos de hasta 20 kHz y que pueden durar desde milisegundos hasta unos pocos segundos, al ser de baja frecuencia no tienen una gran propagación, por lo que se presume que su producción se asocia a la colaboración y coordinación durante la búsqueda de alimentos, estos silbidos son especie específicos, con un alto componente regional que lo hace propicio en el reconocimiento de compañeros de un mismo grupo o de

grupos familiares, teniendo un componente comunitario de importancia (Dudzinski et al., 2009; Simard et al., 2011).

Para los misticetos, es probable que los sonidos producidos sirvan para sincronizar actividades biológicas o conductuales, como son la alimentación y reproducción (Dudzinski & Hill, 2018; Edds-Walton, 1997).La comunicación acústica vocal incluye llamadas (Calls) y cantos (Songs) (Clark 1990). Esto ha sido bastante estudiado en la ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*), al tener una complejidad de vocalizaciones se ha podido identificar vocalizaciones asociadas a alimentación, reproducción y sociabilización (Au & Lammers, 2014; Parks et al., 2014; Parsons et al., 2008; Schall et al., 2021). Así mismo, se ha descrito el uso de gruñidos, golpes y choques asociadas comunicación no vocal asociado a conductas sociales intra y/o intergrupales (Dunlop et al., 2008).

Por el contrario, esta información es escasa para otras especies de ballenas, conociéndose que estas usan bandas de baja frecuencia para comunicarse (Edds-Walton, 1997; Širović et al., 2007). En las ballenas azules (*Balaenoptera musculus*), por ejemplo, los cantos son producidos por machos y están relacionadas posiblemente con la reproducción (Oleson *et al.* 2007). También se ha asociado la presencia de vocalizaciones con actividades de alimentación basado en los patrones diarios, donde la presencia de vocalizaciones ocurren al amanecer y anochecer relacionadas a migración vertical de krill (Wiggins et al., 2005). Para la ballena fin (*Balaenoptera physalus)* se ha descrito vocalizaciones asociadas a reproducción y alimentación (McDonald et al., 1995; Watkins, 1981; Watkins et al., 1987).

4. Impacto del ruido submarino en los cetáceos

En el océano, el ruido antropogénico, particularmente generado por embarcaciones, se ha convertido en una preocupación creciente. En las últimas décadas, la presencia e intensidad de este ruido ha aumentado significativamente (Hildebrand 2009). El mayor impacto se produce en bajas frecuencias, específicamente entre 5 y 500 Hz, donde el ruido antropogénico contribuye de manera significativa al sonido ambiente (Hildebrand 2004). Este es un factor de perturbación importante que afecta a los ecosistemas marinos a escala global (Clark et al., 2009; Merchant

et al., 2015), generando una serie de efectos en los mamíferos marinos, en especial en los cetáceos (Hildebrand, 2004).

Dentro de los efectos negativos causados por la presencia del ruido antropogénico, encontramos la pérdida de audición (Mooney et al., 2009; Schlundt et al., 2000), cambios en el comportamiento (Blair et al., 2016; Finneran et al., 2000; Miller et al., 2015; Sørensen et al., 2023) y el enmascaramiento de las señales acústicas (Cholewiak et al., 2018; Clark et al., 2009; Pearson et al., 2023), entre otros, donde el efecto más dañino puede ser la muerte.

La pérdida de audición en los cetáceos se produce principalmente debido a la exposición de sonidos de alta intensidad, y puede ser tanto temporal como permanente (André et al., 2007; Morell et al., 2021; Tougaard et al., 2015). La pérdida se produce principalmente porque las emisiones de diversos sonidos antropogénicos están en la misma frecuencia en donde las especies de cetáceos escuchan (Weilgart, 2007). Esta pérdida auditiva puede llevar a una comunicación deficiente con otros individuos de la misma especie, interrumpe la ecolocalización y forrajeo, lo que puede llevar a la perdida de orientación, dificultad de alimentación, el apareamiento y la vulnerabilidad frente a depredadores (Hildebrand, 2004). En delfines modelos indican que los sonares podrían producir una perdida temporal de audición (Kastelein et al., 2021; Mooney et al., 2009).

El efecto del ruido antropogénico en el comportamiento de los animales se manifiesta como alteraciones provocadas por la presencia de dicho ruido. Estos cambios pueden incluir variaciones en la respiración superficial y los patrones de respiración (Williams et al., 2022), interrupciones en las vocalizaciones (Melcón et al., 2012) y una mayor tendencia a huir (Hildebrand, 2004), entre otros comportamientos. Por ejemplo, se ha observado que el zifio de Cuvier, en respuesta al sonido de embarcaciones, reduce el tiempo de inmersión y disminuye el tiempo dedicado a la ecolocalización, lo que resulta en una disminución del 50% en la eficiencia de la alimentación (Aguilar Soto et al., 2006). En los odontocetos pequeños, se ha registrado un cambio en la velocidad de natación como respuesta a las prospecciones sísmicas (Stone & Tasker 2006).

Por otro lado, el ruido antropogénico se puede presentar de manera circunstancial o crónica donde puede ser temporal o de manera permanente. El ruido antropogénico aumenta el sonido ambiente lo que produce una pérdida en el ambiente de las señales acústicas. Esta pérdida también se conoce como enmascaramiento o "masking" de las señales y ocurre cuando el nivel de ruido ambiental aumenta y tiene como resultado la reducción de la capacidad del animal para detectar un sonido relevante, (Hildebrandt 2004, Weilgart 2007).

El enmascaramiento de las señales biológicas es uno de los temas que más preocupan del impacto del ruido antropogénico y para ello es esencial tener alguna noción sobre la propagación del sonido. El océano, como medio, está sujeto a factores oceanográficos y batimétricos (Erbe & Thomas, 2022) y esto posibilita que las señales biológicas viajen distancias considerablemente extensas en el océano. Recientemente, se ha prestado una atención significativa a este fenómeno, ya que estudios han evidenciado que el ruido antropogénico incide en la comunicación de las especies marinas. Por ejemplo, estudios demuestran que la presencia de embarcaciones pueden reducir entre un 26% y un 58% el rango de comunicación de odontocetos (Jensen et al., 2009) y >60% en el espacio de comunicación de la ballena franca (Hatch et al., 2012). En ballenas este mismo impacto se ha descrito hasta una reducción del 80% (Cholewiak et al., 2018).

Los impactos del ruido submarino en los cetáceos se han consolidado como un asunto de importancia en los estudios científicos recientes (Gordon, 2018; Johnston & Painter, 2024; Miller et al., 2022; Weilgart, 2007; Williams et al., 2015). Este tema también ha ganado importancia en la política mundial y en la toma de decisiones. Por ejemplo, la NOAA en Estados Unidos ha desarrollado una Estrategia de Ruido Oceánico (Gedamke et al., 2016; Harrison et al., 2016). En Australia, desde 1999, se han realizado esfuerzos para proteger los ecosistemas marinos mediante la reducción del ruido antropogénico (Environment Protection and Biodiversity Conservation Act 1999, 1999). En Canadá se ha implementado la reducción de velocidad de las rutas marítimas (ECHO, 2023). La Unión Europea ha establecido un marco para la protección marina que busca mantener los niveles de ruido sin que las especies y los ecosistemas se vean perjudicados (Cruz et al., 2022; Merchant et al., 2022). En Chile, esta preocupación también está presente en 2020 se conformó el Comité Operativo de Ruido Submarino del Ministerio del Medio Ambiente (Ministerio de Medio Ambiente, 2020), se creó una Guía Técnica sobre los impactos del ruido submarino y se integró esta temática en la normativa de impacto ambiental

(SEIA, 2022). Estas estrategias nacionales e internacionales destacan la necesidad de monitorear, investigar, reducir y mitigar los impactos del ruido antropogénico en la fauna marina, enfocándose en muchos casos en los cetáceos (Burnham et al., 2021; Luttenberger & Gudeji, 2024).

5. El Archipiélago de Humboldt

El Archipiélago de Humboldt corresponde a un conjunto de islas e islotes ubicadas en la zona centro norte de Chile (~28° - 29° S) entre las regiones de Atacama y Coquimbo (Luna-Jorquera et al., 2012). El sector del área marina alrededor de Isla Chañaral alberga una alta diversidad de peces, invertebrados marinos y mamíferos marinos, tales como pinnípedos y cetáceos (Sepúlveda et al., 2016, 2017). Es hábitat de una población residente de delfín nariz de botella (*Tursiops truntacus*) (Gibbons, 1992; Pérez-Alvarez et al., 2018; Santos-Carvallo et al., 2018). Dentro de las especies de cetáceos que se pueden observar se encuentran: delfines nariz de botella no residentes, delfín de Riso (*Grimpus griseus*), delfín común (*Delphinus sp*.), delfín oscuro (*Lagenorhynchus obscurus*), orcas (*Orcinus orca*), ballena minke (*Balaenoptera bonaerensis*), ballena jorobada (*M. novaeangliae*), ballena azul (*B. musculus*), y ballena fin (*B. physalus*), entre otras. Esta es un área de importancia para las ballenas, puesto que ha sido identificada como zona de permanencia (Sepúlveda et al., 2018) y alimentación de la ballena fin (Buchan et al., 2021a; Pérez-Álvarez et al., 2006; Toro et al., 2016) y de la ballena azul (Buchan et al., 2021b) dado a que está ubicada en la corriente de Humboldt y por las condiciones geográficas se producen eventos de surgencias (Thiele et al., 2007)y altas densidades de presas como el kril (Buchan et al., 2024).

Dada la gran presencia de fauna en la zona es que las actividades turísticas han tomado un rol importante en la comunidad. En el 2016 habían inscritas 32 embarcaciones para realizar turismo en la zona de la reserva, pero 21 ejercían activamente (Sepúlveda et al. 2017). Dado al apogeo del avistamiento de fauna es que esta actividad en la zona ha aumentado en los últimos años produciendo cambios de embarcaciones, aumento de aforos y de embarcaciones. Por otra parte, esta ha sido una zona de conflicto social al estar cerca de una zona de interés para la construcción de un mega puerto minero y plantas desaladoras (Cárcamo, 2024). A pesar de las tensiones

existentes en 2024 se declara Área Marina Mostera Protegida de Múltiples Usos AMCP-MU (Ministerio de Medio Ambiente, 2023).

Dado que las vocalizaciones de las ballenas azules y fin se encuentran dentro del rango de frecuencia de las emisiones de las embarcaciones (Clark et al., 2009; Širović et al., 2007) y que existe información documentada sobre los efectos adversos que estas emisiones pueden tener en estas especies (Erbe et al., 2019; R. Williams et al., 2014) resulta crucial identificar los posibles impactos asociados al ruido antropogénico. Es especialmente importante evaluar cómo este ruido afecta la comunicación de las ballenas en áreas de frecuente presencia, como es la zona de la Isla Chañaral.

6. Hipótesis

El ruido antropogénico, particularmente el originado por las embarcaciones menores, impacta la comunicación de las ballenas la Reserva Marina Isla Chañaral. De esta manera se predice que al aumentar este ruido antropogénico en el área de estudio se reduce el espacio de comunicación de las ballenas.

Objetivo General

Evaluar el impacto del ruido de origen antropogénico producido por embarcaciones menores en el espacio de comunicación de las ballenas azul y fin en el área aledaña a la Reserva Marina Isla Chañaral.

Objetivos Específicos

I. Caracterizar el sonido biológico, antropogénico y ambiental de baja frecuencia en el área aledaña a la Reserva Marina Isla Chañaral.
II. Estimar el espacio de comunicación de las ballenas azules y fin en el área aledaña a la Reserva Marina Isla Chañaral.
III. Evaluar el impacto del ruido antropogénico de las embarcaciones presentes en el área aledaña a la Reserva Marina Isla Chañaral en el espacio de comunicación de las ballenas azules y fin.

II METODOLOGIA

1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en las aguas adyacentes a la Reserva Marina Isla Chañaral (29°01'S, 71°34'W). Esta reserva se encuentra ubicada al sur de la región de Atacama, frente a la localidad de Caleta Chañaral de Aceituno en la comuna de Freirina (Fig. 2).

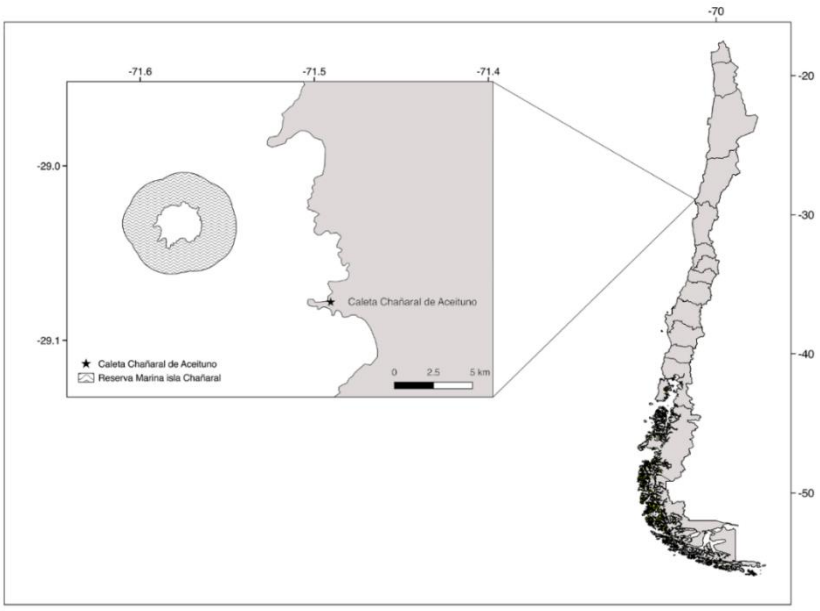


Figura 2. Ubicación geográfica de la Reserva Marina Isla Chañaral, frente a la caleta Chañaral de Aceituno, región de Atacama, Chile.

2. Recopilación de la información acústica

Los datos de monitoreo acústico pasivo fueron obtenidos por el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) con un hidrófono instalado en la columna de agua en una zona cercana a la Isla Chañaral (29°13'20" S, 71°32'34" W, véase Fig. 3a). El hidrófono fue anclado en una línea con un liberador acústico a una profundidad a 80 metros en un sector con una profundidad máxima de 100 metros, fue fondeado con tres eslabones de 40 kg cada uno unido con un anclaje de goma (Fig. 3b). La línea de anclaje no presenta piezas metálicas que interfieran en el proceso de grabación. Las grabaciones se realizaron con un hidrófono de la serie SoundTrap 300 de la marca Ocean Instrument (ver:

http://www.oceaninstruments.co.nz/soundtrap-300/), alimentado con una batería recargable y una memoria extraíble de 256 Gb. Se grabó a una frecuencia de muestreo de 24 kHz con una dinámica de 16 bits.

La grabación fue no continua durante 24 horas, en dos periodos durante 13 meses, desde diciembre 2017 a marzo 2019 (Tabla 1). La diferencia en los tiempos de grabación entre períodos se debió a la prioridad de mantener la memoria y la batería durante la primera etapa y a la logística del recambio. La interrupción de la grabación se realizó cuando fue necesario cambiar memoria, betería, ajustar equipo y mantención de estructuras.

Tabla 1. Resumen del tiempo de grabación, fechas de inicio y termino de periodo de grabación y horas totales del hidrófono anclado en la zona de la Isla Chañaral.

Periodo	Tiempo de grabación	Fecha inicio	Fecha termino	Total horas
1	10 min de cada hora	01/12/2017	22/08/2018	9041.3
2	20 min de cada hora	01/12/2018	31/03/2019	968

a) b)

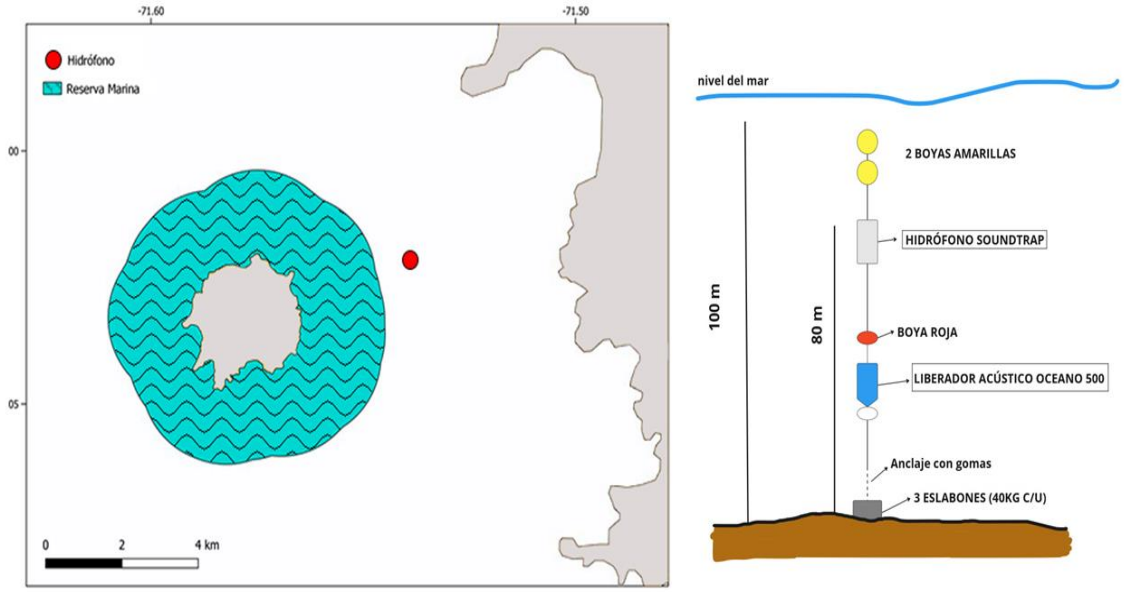


Figura 3. Área de estudio, (a) incluye la Reserva Marina Isla Chañaral (en celeste) y la ubicación del hidrófono (punto rojo), (b) esquema del anclaje del hidrófono en la columna de agua y su anclaje de hidrófono al fondo marino.

3. Caracterización del paisaje acústico.

Para la caracterización del paisaje acústico en las aguas adyacentes a la Isla Chañaral se llevaron a cabo diferentes identificaciones y caracterizaciones de sonidos de origen biológico, antropogénico y ambiental. Para los sonidos de origen biológico se identificaron y caracterizaron las señales acústicas de las ballenas azul (*Balaenoptera musculus*) y fin (*Balaenoptera physalus*) (Ver la sección 3.1). Los sonidos de origen antropogénico se consideraron provenientes de las embarcaciones presentes en el área de estudio mientras que el sonido ambiental abarco el ruido de fondo de la zona, el cual se evaluó a través de métricas acústicas estándares como el SPL (Merchant et al., 2015).

La caracterización se realizó por temporalidades, analizando un total de 2009.3 horas de grabación (Tabla 2), con el objetivo de identificar posibles patrones temporales durante el tiempo de grabación.

Tabla 2. Temporalidad para análisis, fecha de inicio y termino de cada temporada y total de horas de grabación por temporada.

Temporalidad	Fecha inicio	Fecha final	Total horas de grabación
verano	Diciembre 2017	Febrero 2018	357.5 horas
otoño	Marzo 2018	Mayo 2018	368.5 horas.
invierno	Junio 2018	Agosto 2018	315.8 horas
verano	Diciembre 2018	Febrero 2019	719.8 horas
otoño	Marzo 2019	Marzo 2019	247.7 horas
		Total	2009.3horas

3.1. Identificación de sonidos biológicos en aguas adyacentes a la Isla Chañaral.

La identificación y caracterización de las señales biológicas emitidas por las ballenas azul (*B. musculus*) y fin (*B. physalus*) se evaluó mediante el programa Raven Pro 1.6 (Bioacoustics Research Program, 2012). La identificación de las señales fue realizada de forma manual, permitiendo la discriminación y caracterización de cada tipo de vocalización. La señal identificada es anotada mediante una caja de anotación, que integra la señal lo más ajustada posible. Cada anotación se compila en una tabla llamada tabla de selección que además de cuantificar las señales añade otras variables como: frecuencia, delta frecuencia, peak frecuencia, delta duración, peak duración, entre otras.

3.1.1. Señales acústicas de la ballena Azul (*B. musculus*).

Se realizaron el reconocimiento, identificación y análisis de las señales acústicas de la ballena azul para la zona de la Isla Chañaral, en el Pacífico sureste. Se registraron dos tipos de vocalizaciones: la señal SEP2 y el DCall. La señal SEP2 es única para la zona del Pacífico sureste (Fig. 4a). En esta tesis adicionalmente se registraron las señales C y D, que habían sido caracterizadas previamente en la zona (Alosilla, 2019; Buchan et al., 2014) en la frecuencia de 23 Hz, que corresponde a la señal fundamental o donde se presenta la señal acústica completa sin mayor pérdida. En cuanto a las señales DCall (Fig. 4b), se registraron las vocalizaciones en una frecuencia de entre 25 y 100 Hz y una duración de entre 1 y 7 segundos (Oleson et al., 2007; Samaran et al., 2010; Schall et al., 2019; Širović et al., 2007).

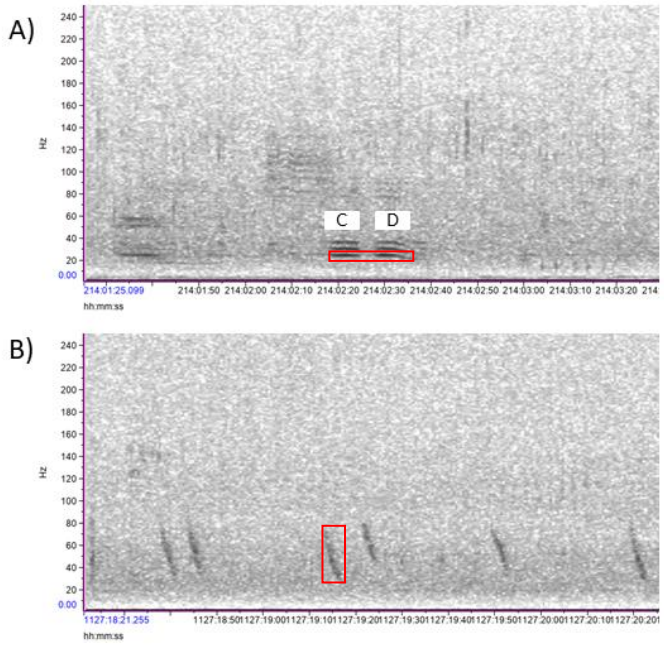


Figura 4. Vocalizaciones de ballena azul, A) Señal SEP2 y sus unidades, B) Señal D-call. Para esta figura el eje Y corresponde a la frecuencia (Hz) de la grabación y el eje X corresponde al tiempo (hh: mm: ss) de la grabación. Cada señal muestra la caja de anotación para la identificación de la señal. Raven Pro 1.6 ventana 4096 FFT, 50% overlap, Hann window.

3.1.2. Señales acústicas de la ballena Fin (*B. physalus*)

El reconocimiento, identificación y análisis de las señales acústicas para la ballena en la zona de la Isla Chañaral para dos tipos de vocalización, correspondiente a la vocalización de 20 Hz y Downsweep (Ds). La señal de 20 Hz (Fig. 5a) se encuentra a una frecuencia entre 15 y 40 Hz con una duración entre 0.2 a 6 segundos (Morano et al., 2012; Schall et al., 2019; Širović et al., 2004, 2007; W. A. Watkins et al., 1987; Weirathmueller et al., 2017). La señal Ds (Fig. 5b) es una señal con una frecuencia entre 20 y 120 Hz con una duración cercana a 1 s (Vega et al., 2023).

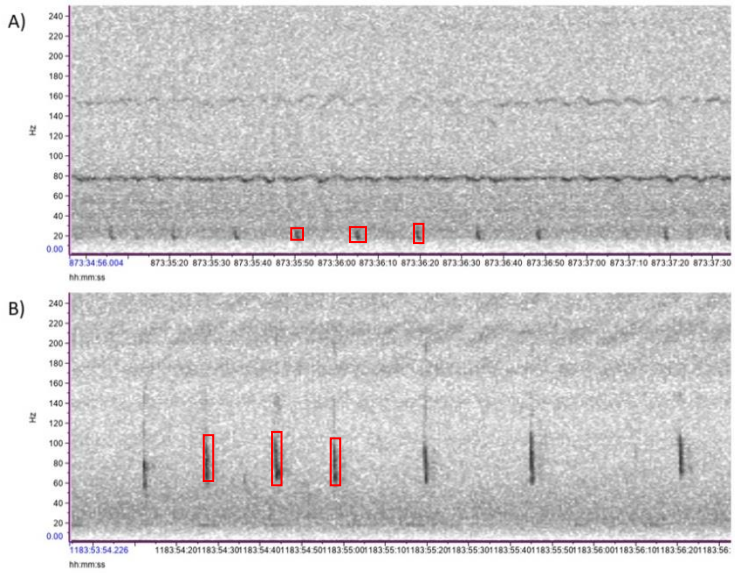


Figura 5. Vocalizaciones de ballena fin, A) Señal 20 Hz, B) Señal downsweep (Ds). Para esta figura el eje Y corresponde a la frecuencia (Hz) de la grabación y el eje X corresponde al tiempo (hh: mm: ss) de la grabación. Cada señal muestra la caja de anotación para la identificación de la señal. Raven Pro 1.6 ventana 4096 FFT, 50% overlap, Hann window.

3.1.3. Análisis estadístico sonidos biológicos

Las señales identificadas mensualmente se normalizaron en función de la cantidad de horas de grabación durante el período de grabación para obtener una tasa total por hora mensual. El primer periodo tiene un total de 1041 para los 9 meses y el segundo periodo un total de 968 horas para 4 meses. Se registraron el total de señales, junto con la media y la desviación estándar (dev. est) para analizar las tendencias descriptivas durante el período de estudio. Además, se calculó la media y la desviación estándar para las características acústicas de las métricas de la señal (Tabla 3), las que serán usadas para el cálculo del espacio de comunicación posterior

Se comparó la tendencia de la presencia de señales acústicas entre las estaciones estudiadas mediante pruebas de comparación de grupos, en este caso: test de Kruskall para pruebas no paramétricas y ANOVA de una vía para pruebas paramétricas, considerando un nivel de significancia de 0.05. Todos los análisis fueron realizados con el programa R (R Core Team, 2023) y RStudio (RStudio Team, 2020).

Tabla 3. Métricas estimadas en el programa Raven Pro para el análisis de las vocalizaciones.

Métrica	Que mide	Unidad
Low frequence	Frecuencia más baja	Hz
High frequence	Frecuencia más alta	Hz
Delta frequence	Intervalo de frecuencia	Hz
Peak frequence	El punto más alto de la frecuencia	Hz
Delta tiempo	Intervalo de duración	Segundos

3.2. Caracterización y análisis de sonidos antropogénicos en aguas adyacentes a la Isla Chañaral.

La identificación del sonido de origen antropogénico se realizó mediante el uso de un detector acústico utilizado en el software R (R Core Team, 2023). El detector fue adaptado del usado previamente por el investigador Matías Muñoz (Com pers). Para facilitar la ejecución del detector los archivos originales fueron remuestreados a una frecuencia de muestreo de 300 Hz, esto para no sobrecargar la detección dejando una frecuencia de muestreo donde se encuentran las vocalizaciones de las ballenas y la presencia de las embarcaciones.

El detector empleado es en base a la amplitud (U) y el tiempo (s). La detección positiva de las embarcaciones se realiza cuando la amplitud sobrepasa un umbral de referencia establecido durante un tiempo determinado (Fig. 6). Este criterio para diferenciar los sonidos de origen biológico y antropogénico fue el tiempo de duración de las señales acústicas, caracterizando como sonido de embarcación a toda señal continua mayor a 60 segundos y toda señal menor a 60 segundos fue categorizada como sonido biológico. Esta duración crítica (60 s) se consideró puesto que fue la duración de las señales antropogénicas analizadas de 500 archivos obtenidos al azar en el programa R pro 1.6. La duración de la señal antropogénica (60 s) siempre fue mayor a todas las señales biológicas estudiadas (de 1 a 7 segundos aproximadamente) no dando cabida a falsos positivos, es decir, que las señales biológicas sean identificadas como datos antropogénicos y viceversa.

Se procedió a la asignación aleatoria de las categorías de umbrales después de ajustar tanto el umbral más bajo como el más alto detectado hasta conseguir que el modelo se ejecutara completamente. Posteriormente se consideraron para análisis aquellos archivos que se encontraban dentro del rango de al menos dos umbrales. En este proceso, se destacaron positivamente aquellos que exhibían, durante su duración, al menos una señal horizontal (Fig. 7a) o una señal de campana invertida (Fig. 7b). Posteriormente los archivos fueron separados según la categoría antropogénica y libre de ruido antropogénico, luego los archivos fueron validados mediante una revisión visual para evitar falsos positivos o negativos en la separación de los archivos.

Para identificar tendencias asociadas a la presencia del ruido antropogénico se realizaron análisis para caracterizar la dinámica anual y temporal (ver Tabla 2) de la contribución antropogénica en el tiempo de grabación. Se estimó también la probabilidad de presencia del ruido antropogénico durante 24 horas, para identificar las horas más altas de la presencia acústica antropogénica. Primero, se analizó la tendencia anual y temporal, para verano, otoño e inverno, de la presencia antropogénica mensual y por temporada. Para esto se normalizó la información para obtener una tasa mensual porcentual de archivos antropogénicos durante el mes según:

$$\text{Porcentaje mensual} = \left(\frac{\text{Número de archivos antropogénicos}}{\text{Número total de archivos}}\right) \times 100$$

Donde el porcentaje mensual antropogénico se calculó según el total de archivos con presencia antropogénica en relación con la cantidad total de archivos durante el mes. Así se puede ver la influencia antropogénica mensual durante el periodo de grabación. Luego la información mensual se clasificó por estación donde se realizó una comparación de grupos con test de Kruskall para pruebas no paramétricas y ANOVA de una vía para pruebas paramétricas, considerando un nivel de significancia de 0.05. Todos los análisis fueron realizados con el programa R (R Core Team, 2023) y RStudio (RStudio Team, 2020).

Para el análisis de la caracterización de la dinámica diaria (24 horas) durante el periodo de estudio, se calculó la probabilidad de presencia antropogénica porcentual para cada hora durante todo el periodo de grabación. Primeramente, se creó una matriz de presencia y ausencia de archivos con presencia acústica antropogénica para cada hora, por mes. Luego, se procedió a calcular la probabilidad porcentual con la siguiente formula:

$$\text{Probabilidad de presencia } (\%) = \left(\frac{\text{Total de eventos antropogénicos a la hora } h}{\text{Total de eventos antropogénicos en 24 horas}}\right) \times 100$$

De esta manera, podemos estimar patrones de presencia acústica antropogénica durante el día. Asimismo, se visualizó esta información por periodos durante el día para ver si hay diferencias entre periodos diurnos o nocturnos. Para ello, la probabilidad de presencia se calculó para: noche (01:00-06:00 hr), mañana (07:00-12:00 hr), tarde (13:00-18:00 hr) y anochecer (19:00-23:00 hr) (adaptado de Wiggins et al., 2005), para comparar los periodos durante el día se realizó un

análisis estadístico con una prueba de Kruskall para datos con distribución no paramétricos y ANOVA de una vía para datos con distribución paramétricas, considerando un nivel de significancia de 0.05. Todos los análisis fueron realizados con el programa R (R Core Team, 2023) y RStudio (RStudio Team, 2020)

3.3. Caracterización y análisis del sonido ambiental en las aguas adyacentes a la Isla Chañaral.

Para identificar el sonido ambiental en la zona de la reserva marina, se realizó un análisis de nivel de banda de 1/3 octava, usando la herramienta TOLs del programa PAMGuide (N. Merchant et al., 2015) MATLAB (Mathworks, 2022). El análisis se calculó para una frecuencia de 10 Hz a 150 Hz, para evitar la interferencia de grabación de ruido electrónico. De esta forma se obtiene sonido ambiental para cada banda de frecuencia. Además, se utilizó una ventana Hann con un 50% de overlap, con una ventana de 1s y un ancho de banda de 1 dB re 1 μPa, utilizando una calibración de ambiente submarino tipo end-to-end con una sensibilidad de -185.8 dB, según las indicaciones técnicas del fabricante del hidrófono.

Los datos se separaron en dos categorías: una situación ambiental natural (libre de ruido antropogénico) y otra con ruido antropogénico. Los datos ambientales natural, libre de ruido antropogénico, se categoriza en tres temporadas (verano, otoño, invierno). Se seleccionaron aleatoriamente 30 horas de grabación por estación, lo que conforma un set de datos manejable y representativo en proporción a la totalidad de horas de grabación. La data del verano, otoño e invierno se unieron para ambos años, permitiendo una visualización consolidada por temporada.

Para los datos ambientales con presencia antropogénica, se realizaron tres categorías: 1) Nivel máximo registrado, 2) verano antropogénico y 3) invierno antropogénico. Para el nivel máximo registrado se utilizaron los archivos con el mayor umbral detectado mediante un nuevo análisis con el detector, dejando los archivos más “ruidosos” los cuales se editaron para dejar solamente la presencia acústica de las embarcaciones eliminando lo restante (Anexo 2).

Para evaluar la variabilidad de los datos, se utilizó la intensidad del sonido (Sound Pressure Level, SPL), esta medida es una de las más usadas en contextos acústicos (N. Merchant et al., 2015) y forma parte de las normas ISO desde 1999 (Acoustics: Determination of Occupational Noise Exposure and Estimation of Noise-induced Hearing Impairment. ISO-1999, 1990). El SPL fue medido mediante la herramienta "Broadband" de PAMGuide, donde se analizó la media y la desviación estándar (dev. est) para las temporadas naturales y antropogénicas, con el fin de estudiar las tendencias descriptivas tanto en registros ambientales naturales como antropogénicos.

Para el análisis de las tendencias naturales se realizaron pruebas estadísticas correspondiente a test de Kruskal para pruebas no paramétricas y ANOVA de una vía para pruebas paramétricas, según corresponda considerando un nivel de significancia de 0.05. Para el análisis se formaron set de datos con columnas de 5.000 filas dada la magnitud de los datos entregados por PAMGuide los que superaban el máximo a analizar por el software RStudio.

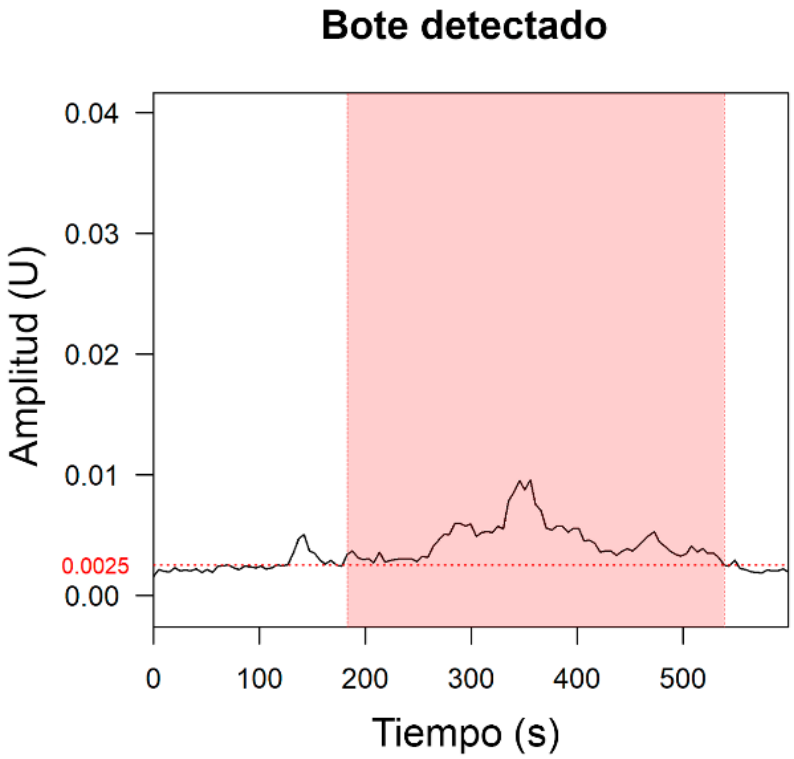


Figura 6. Ejemplo de modelo de detección positiva de embarcación en la categoría de sonidos antropogénicos usando el detector. La línea punteada indica el umbral de referencia y la franja rosada corresponde al tiempo (sobre 60 s) en que la amplitud (U) sobrepasa el umbral, indicando la presencia de embarcaciones.

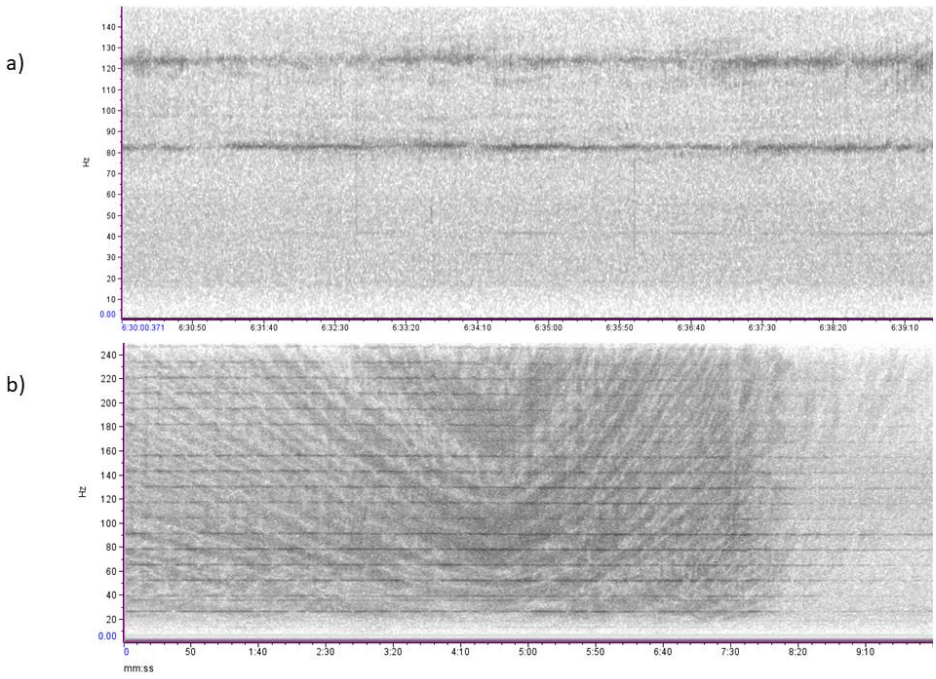


Figura 7. Registro de sonidos de origen antropogénico, donde A) corresponde al espectrograma de un sonido proveniente de una embarcación menor (motor fuera de borda) y B) corresponde al espectrograma de un sonido de embarcación mayor (motor intraborda). Raven Pro 1.6 ventana 512 FFT, 50% overlap, Hann window

3.4. Estimación del Rango de Comunicación (CR) y Espacio de Comunicación (CS) de las ballenas en aguas adyacentes a la Isla Chañaral.

El espacio de comunicación (Communication Space, CS), es definido por Clark et al., (2009) como el volumen que envuelve a un individuo y que permite la comunicación acústica con otros conespecíficos y donde este espacio se ve influenciado por múltiples factores. Para la estimación del CS usaremos un modelo de referencia del área de "escucha" de un hidrófono marino por medio del rango de detección del hidrófono. En este caso reemplazamos el hidrófono por una ballena y calculamos el rango de comunicación (Communication Range, CR), definida como la comunicación direccional (Clark et al., 2009) y el área (CS) donde nuestra ballena va a detectar las vocalizaciones emitidas por otro individuo donde las señales podrán ser recibidas y decodificadas por nuestro sujeto, y donde tenemos una distancia máxima donde nuestra señal se podrá oír y no se perderá con el sonido de fondo. Este espacio depende de diversas condiciones,

como oceanográficas, batimétricas, ruido antropogénico, entre otras. De esta forma podemos representar el CS como el área máxima donde se captan las vocalizaciones (Fig. 8). Se realizará la estimación de CS bajo tres escenarios para cada vocalización, el primer escenario es en un ambiente natural libre de ruido antropogénico, el segundo es un ambiente antropogenizado y el tercero es un escenario con el nivel antropogénico máximo registrado.

La estimación del rango de comunicación (CR) es fundamental para el cálculo de CS y es obtenida con dos insumos:

1. Modelo Acústico Dependiente del Rango (RAM) propuesto por Collins (1993).
2. Ecuación de Sonar Pasivo desarrollada por Urick (1975).

El modelo RAM proporciona la cantidad de decibelios (dB) perdidos en una distancia específica, ofreciendo así un modelo de pérdida de transmisión (TL) de la señal entre el emisor y el receptor en diferentes distancias. Para realizar este cálculo, se requiere información del ambiente, incluyendo datos de batimetría, temperatura, salinidad y presión de la columna de agua (Tabla 4).

Por otro lado, la ecuación del sonar pasiva determina a qué distancia (en kilómetros) una señal emitida deja de ser detectada por el emisor y en qué punto se pierde ante el ruido de fondo. Este enfoque proporciona información crucial sobre los límites de detección de la señal y su vulnerabilidad frente al entorno acústico circundante.

$$TL_m = SL - SNR - NL$$

Donde TL_m representa la máxima pérdida de transmisión de la señal (en dB), SL (nivel de fuente) es el nivel de la señal estudiada en decibelios a 1 metro re:1uPa, SNR (relación señal/ruido) indica el nivel en dB de la señal emitida en comparación con el ruido ambiental, y NL (nivel de ruido) es el nivel de ruido ambiental o de fondo en dB. Los valores de SL y SNR fueron obtenidos a través de la literatura. El NL es suministrado por los análisis anteriores (ver Sección 3.3), especialmente por la caracterización de sonido ambiental de banda de 1/3 de octava del sonido ambiental natural, sonido ambiental antropogénico y en nivel máximo nivel registrado

y las bandas de frecuencia de interés fueron elegidas con la métrica de frecuencia obtenida en la caracterización biológica (ver Sección 3.1) (Tabla 4).

El análisis de los modelos RAM y TL_m proporciona el rango de comunicación (CR) en kilómetros, que luego se extrapola para estimar el espacio de comunicación (CS). Para calcular el área del CS, se utiliza el CR como radio de un círculo. Este enfoque ofrece una medida más integral de la extensión del espacio donde la comunicación es efectiva, al considerar tanto la pérdida de transmisión como la variabilidad en la señal y el ruido ambiental.

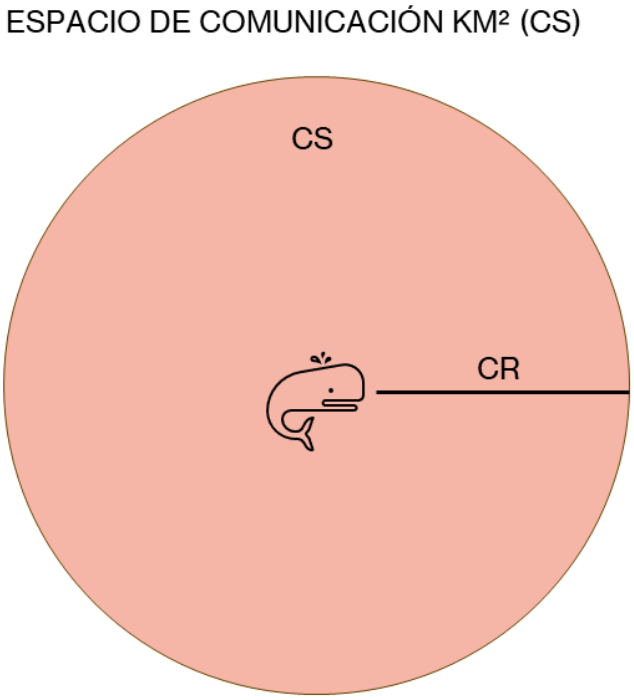


Figura 8. Esquema conceptual del espacio de comunicación (CS km^2) y el rango de comunicación (CR) de una ballena al centro del espacio. Dentro de este espacio la ballena escuchará las vocalizaciones emitidas por un conespecífico y en cambio las que están fuera de este espacio coloreado no serán captadas y por ende no se completará la comunicación.

Tabla 4. Parámetros para cálculo de rango comunicación (CR) de las ballenas la Isla Chañaral y sus aguas adyacentes.

Parámetro	Valor	Fuente
Nivel de fuente Sep2	174 dB at 1 m re 1 uPa	(Samaran et al., 2010)
Nivel de fuente Dcall	156 dB at 1 m re 1 uPa	(Berchok et al., 2006)
Nivel de fuente 20 Hz	189 dB at 1 m re 1 uPa	(Širović et al., 2007; Weirathmueller et al., 2017)
Nivel de fuente Ds	173.5 dB at 1 m re 1 uPa	(Wang et al., 2016)
SNR	10 dB	(Madsen, 2005)
Sonido ambiente (NL)	Para los sets de datos naturales y antropogénicos	
NL ambiente Sep2	Anexo 4	Calculado mediante banda 1/3 octavas a la banda 20 Hz
NL ambiente Dcall	Anexo 4	Calculado mediante banda 1/3 octavas a la banda 50 Hz
NL ambiente 20 Hz	Anexo 4	Calculado mediante banda 1/3 octavas a la banda 20 Hz
NL ambiente Ds	Anexo 4	Calculado mediante banda 1/3 octavas a la banda 60 Hz
Tipo de Fondo	fango	Seleccionada con información disponible en literatura.
Profundidad del emisor	12 m -b. fin	(Alarcón, 2023)
	20 m- b. azul	(Miller et al., 2021)
Profundidad del receptor	80 m	Ubicación hidrófono
Batimetría		Simulación
Velocidad del sonido		Calculada con datos de

		temperatura y salinidad de la columna de agua entregada por CEAZA
Profundidad de la columna de agua	124 m	Dato entregado por CEAZA

3.4.1. Evaluación de efecto del sonido antropogénico en el rango de comunicación de las ballenas en aguas adyacentes a la Isla Chañaral.

Con la estimación del CS (km^2) para cada vocalización de las ballenas azules y fin en los distintos escenarios, se calculó el porcentaje de reducción para cada vocalización, usando:

$$\% \text{ Variación CS} = [(CS_2 - CS_1) / CS_1] \times 100$$

Donde CS_1 (km^2) corresponde al espacio de comunicación en condiciones naturales sin influencia antropogénica y CS_2 (km^2) al espacio de comunicación bajo influencia antropogénica. Esto para identificar el impacto del ruido antropogénico bajo diferentes escenarios (Fig. 9).

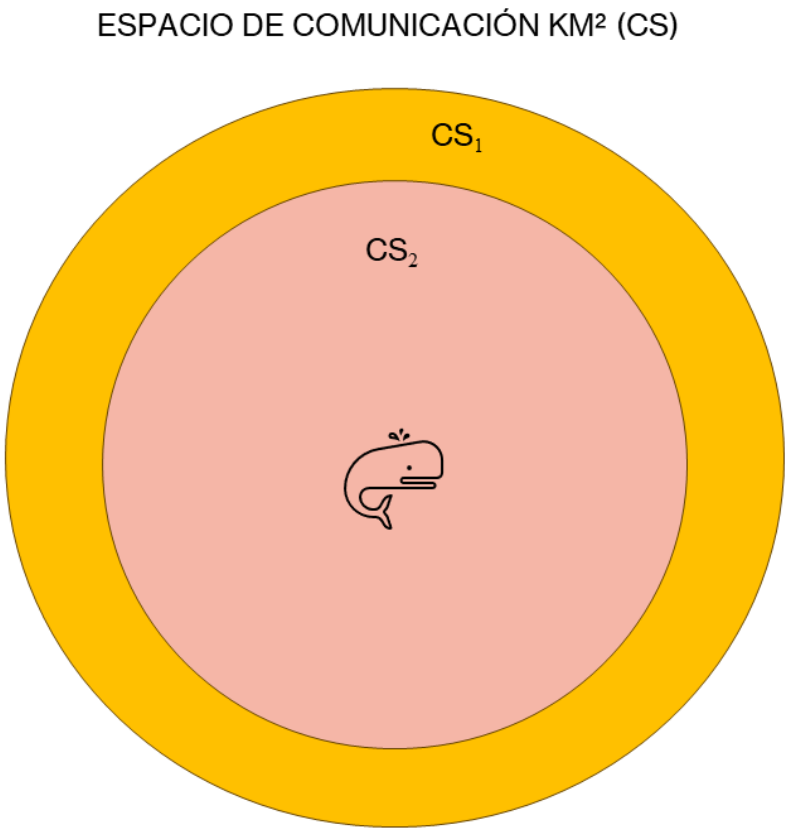


Figura 9 Esquema conceptual del impacto en el área de comunicación dado el efecto de la influencia del ruido antropogénico, donde tenemos un espacio de comunicación (CS_1) bajo condiciones de ruido natural y un espacio de comunicación (CS_2) bajo un aumento de ruido ambiente por causas antropogénicas (ej. ruido de tráfico).

III. RESULTADOS

Se analizaron un total de 2009.3 horas de grabación submarina en el área de estudio. Donde se analizaron 9144 archivos, 6248 para el primer periodo de 10 minutos de grabación para cada hora y 2904 archivos para el segundo periodo de 20 minutos de grabación para cada hora (ver tabla 1).

1. Caracterización biológica en aguas adyacentes a la Isla Chañaral.

1.1. Ballena azul

1.1.1. Señal SEP2

Se registraron un total de 1306 señales de SEP2 durante el periodo de estudio, con una tasa promedio de 0.10 señales por hora. Las señales se registraron principalmente en los meses de verano, entre diciembre y marzo (Fig. 10, Tabla 5), siendo enero de 2019 el mes con la mayor tasa, alcanzando 0.40 vocalizaciones/hora, seguido por enero de 2018 con 0.31 vocalizaciones/hora. En cuanto a la distribución estacional, el verano concentra la mayor presencia de registros de esta señal, seguido por el otoño, con nula presencia en invierno (Fig. 11), mostrando una diferencia significativa entre las temporadas analizadas (*Test Kruskall*, X^2= 9.24, df: 4, *p*=0.01).

Sobre la materia de la señal, la duración promedio de la señal fue de 17.09 (± 2.3) segundos y una frecuencia promedio entre 19,8 (± 1.2) Hz y 25.7 (± 0.6) Hz (Tabla 6).

Tabla 5. Tasa de señales para la vocalización tipo SEP2 de la ballena azul registrada mensualmente durante el periodo de grabación en la zona de la Isla Chañaral.

Mes	Vocalización/hora	Mes	Vocalización/hora
Dic-17	0.03	Jul-18	0.00
Ene-18	0.31	Ago-18	0.00
Feb-18	0.06	Dic-18	0.11
Mar-18	0.05	Ene-19	0.40
Abr-18	0.02	Feb-19	0.29
May-18	0.00	Mar-19	0.03
Jun-18	0.00		

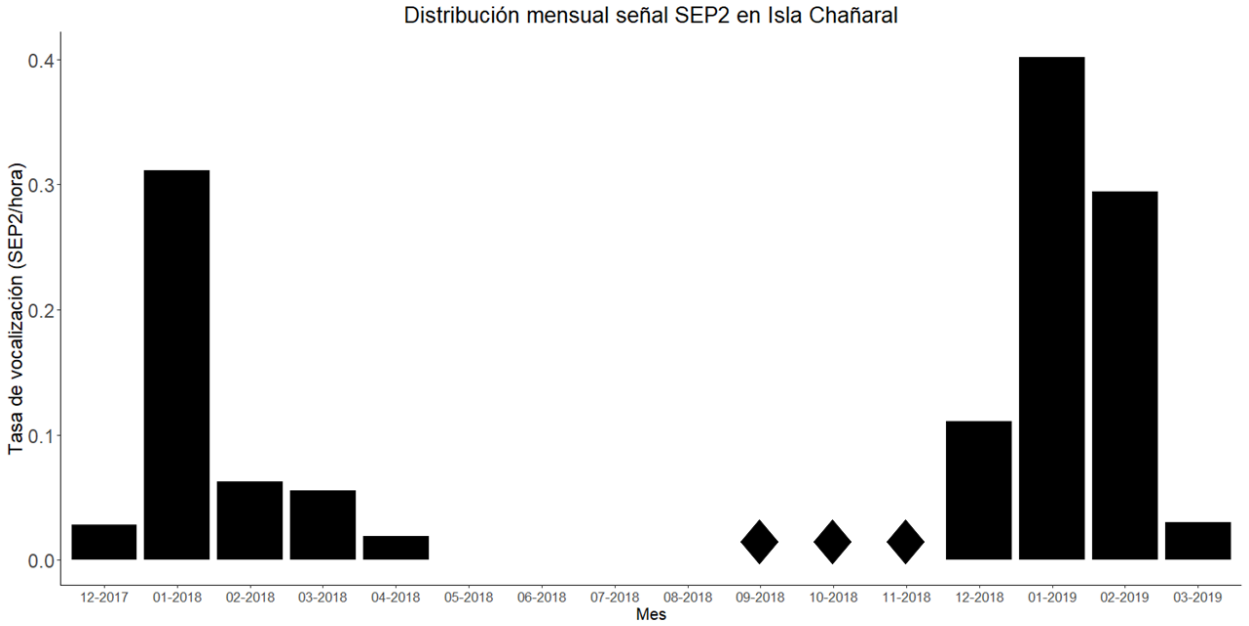


Figura 10. Distribución de la tasa de la señal SEP2 (Vocalización/hora) registradas entre diciembre de 2017 y marzo de 2019 para la ballena azul en la zona de la Isla Chañaral, el símbolo ♦ indica las fechas donde no se realizaron grabaciones.

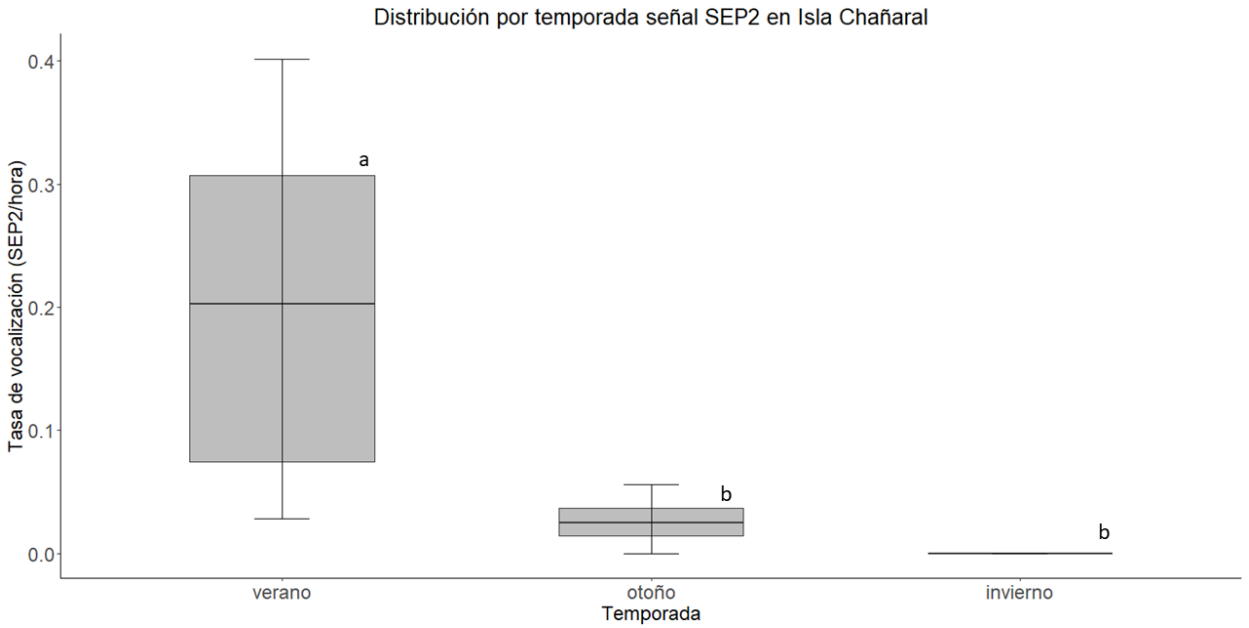


Figura 11. Distribución por temporada la tasa de vocalización de la señal SEP2 (Vocalización/hora) de ballena azul en la zona de la Isla Chañaral. Las letras a y b representan la similitud estadística.

Tabla 6. Promedio y desviación estándar de las métricas analizadas para señales SEP2 de la ballena azul en la zona de la Isla Chañaral durante el periodo de grabación.

	Promedio	Dev. est
low freq (Hz)	19.79	1.17
high freq (Hz)	25.65	0.59
delta time (s)	17.09	2.33
delta freq (s)	5.89	1.31
peak freq (Hz)	23.44	0.33

1.1.2. Señal Dcall

Se registraron un total de 261 señales del tipo Dcall de la ballena azul, con una tasa promedio de 0.02 señales por hora, registradas principalmente durante los meses de verano, entre diciembre y febrero (Fig. 12, Tabla 7). Diciembre de 2018 fue el mes con la mayor tasa, alcanzando 0.15 vocalizaciones/hora. En cuanto a la distribución estacional, el verano concentra la mayor presencia acústica en comparación con el resto del año (Fig. 13), mostrando una diferencia significativa entre las temporadas analizadas (*Test Kruskall*, X^2= 10.63, df: 2, *p*=0.004)

Por otro lado, la duración promedio de la señal fue de 3.5 (± 0.8) segundos y una frecuencia promedio entre 38.7 (± 6.9) Hz y 80.51 (± 9.9) Hz (Tabla 8).

Tabla 7. Tasa de señales para la vocalización tipo Dcall de la ballena azul registrada mensualmente durante el periodo de grabación en la zona de la Isla Chañaral.

Mes	Vocalización/hora	Mes	Vocalización/hora
Dic-17	0.00	Jul-18	0.00
Ene-18	0.03	Ago-18	0.00
Feb-18	0.01	Dic-18	0.15
Mar-18	0.00	Ene-19	0.07
Abr-18	0.00	Feb-19	0.00
May-18	0.00	Mar-19	0.00
Jun-18	0.00		

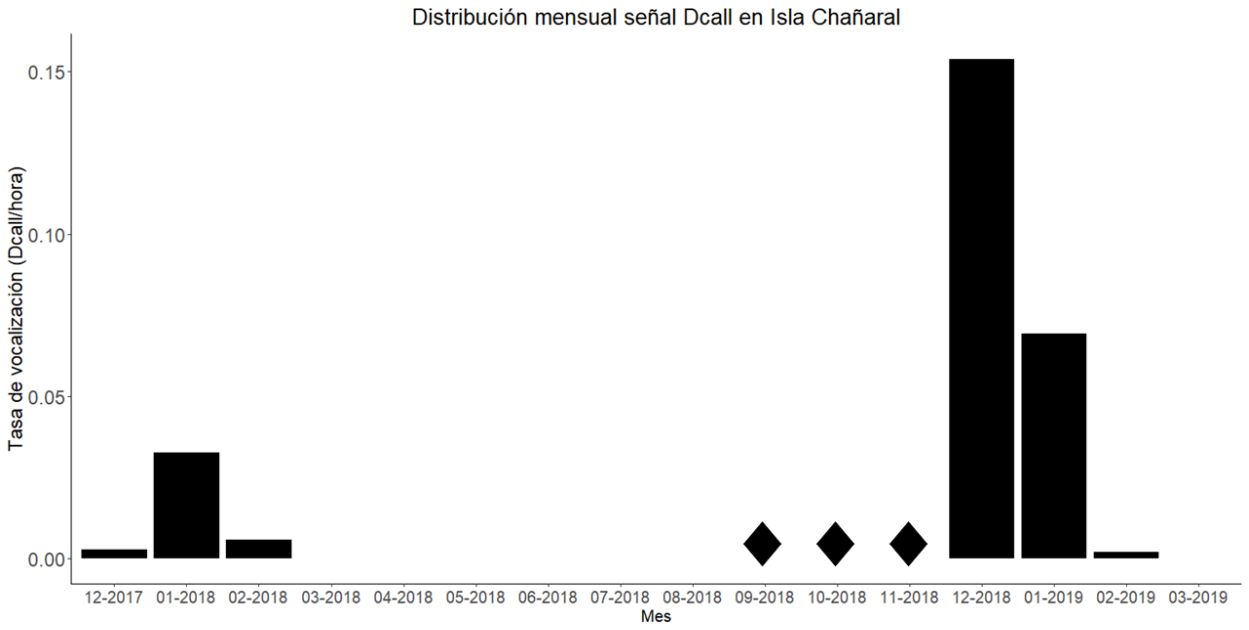


Figura 12. Distribución de la tasa de la señal Dcall (Vocalización/hora) registradas entre diciembre de 2017 y marzo de 2019 para la ballena azul en la zona de la Isla Chañaral, el símbolo ♦ indica las fechas donde no se realizaron grabaciones.

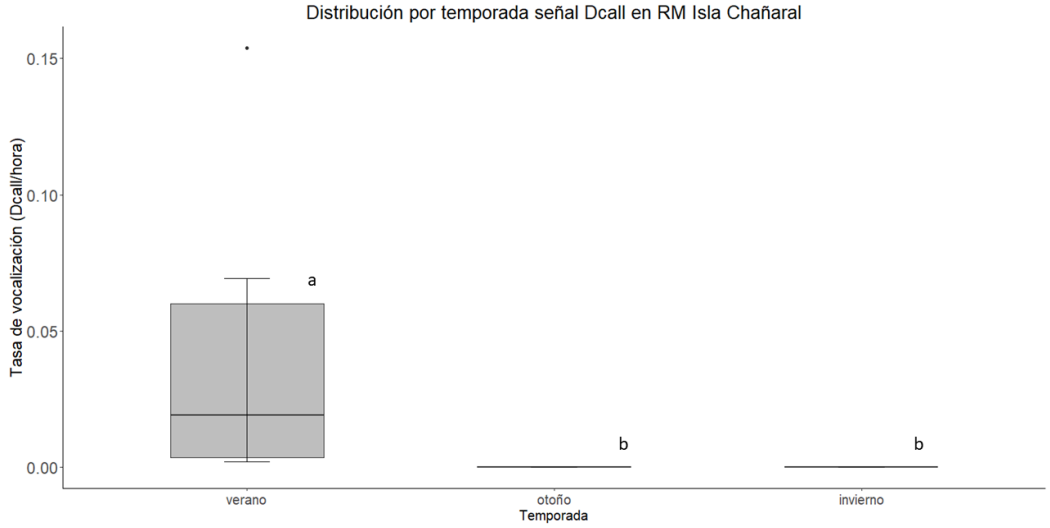


Figura 13. Distribución por temporada la tasa de vocalización de la señal Dcall (Vocalización/hora) de ballena azul en la zona de la Isla Chañaral. Las letras a y b representan la similitud estadística.

Tabla 8. Promedio y desviación estándar de las métricas analizadas para señales Dcall de la ballena azul en la zona de la Isla Chañaral durante el periodo de grabación.

	Promedio	Dev. est
low freq (Hz)	38.7	6.95
high freq (Hz)	80.51	9.94
delta time (s)	3.53	0.76
delta freq (s)	43.9	9.69
peak freq (Hz)	53.28	9.01

1.2. Ballena fin

1.2.1. Señal 20 Hz

Se identificaron un total de 188 señales de la vocalización de 20 Hz de la ballena fin durante el estudio, principalmente durante los meses de junio, julio y agosto de 2018 (Fig. 14), con una tasa promedio de 0.01 señales por hora. Julio fue el mes con la mayor tasa, alcanzando 0.13 señales por hora (Tabla 9). Estas señales se registraron únicamente durante el invierno de 2018 en esta área de estudio (Fig. 15).

Por otro lado, la duración promedio de la señal fue de 1.8 (± 0.4) segundos y una frecuencia promedio entre 14.5 (± 1.4) Hz y 29.3 (± 2) Hz (tabla 10).

Tabla 9. Tasa de señales para la vocalización tipo 20 Hz de la ballena fin registrada mensualmente durante el periodo de grabación en la zona de la Isla Chañaral.

Mes	Vocalización/hora	Mes	Vocalización/hora
Dic-17	0.00	Jul-18	0.13
Ene-18	0.00	Ago-18	0.04
Feb-18	0.00	Dic-18	0.0
Mar-18	0.00	Ene-19	0.00
Abr-18	0.00	Feb-19	0.00
May-18	0.00	Mar-19	0.00
Jun-18	0.02		

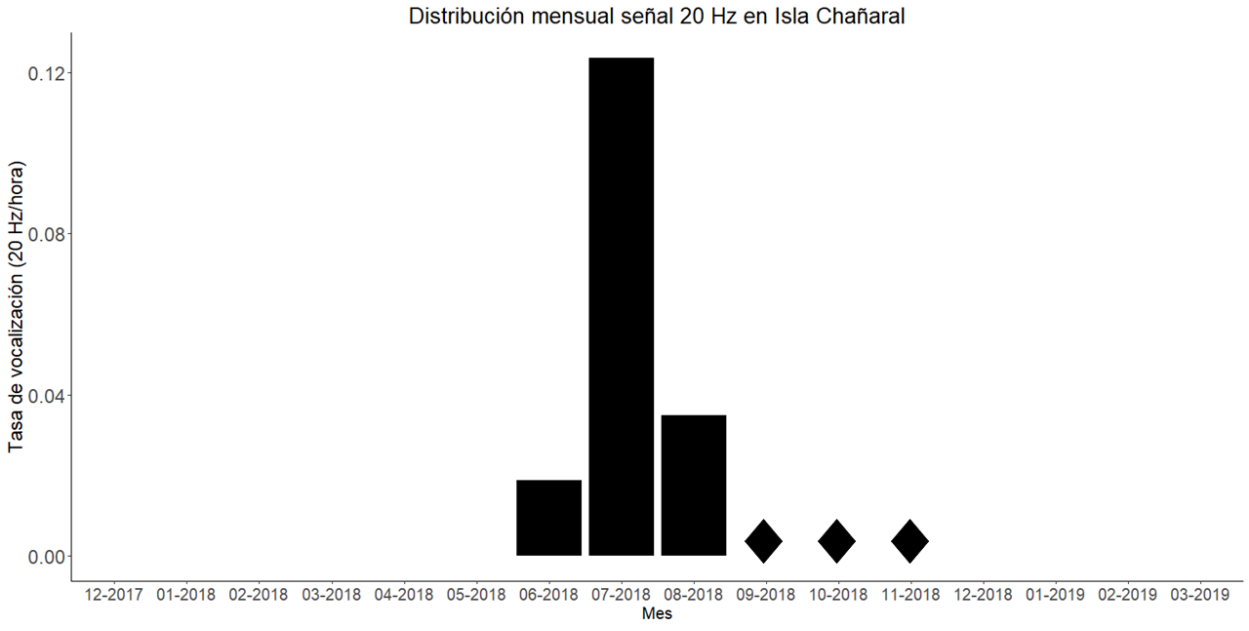


Figura 14. Distribución de la tasa de la señal 20 Hz (Vocalización/hora) registradas entre diciembre de 2017 y marzo de 2019 para la ballena fin en la zona de la Isla Chañaral, el símbolo ♦ indica las fechas donde no se realizaron grabaciones.

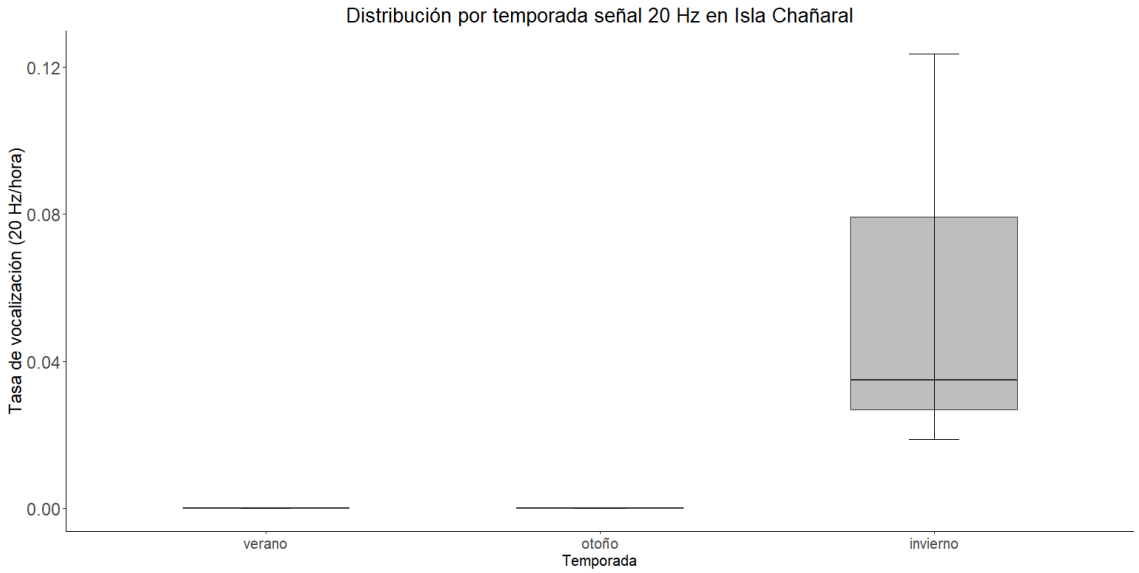


Figura 15. Distribución por temporada la tasa de vocalización de la señal 20 Hz (Vocalización/hora) de ballena fin en la zona de Isla Chañaral.

Tabla 10. Promedio y desviación estándar de las métricas analizadas para señales 20 Hz de la ballena fin en la zona de la Isla Chañaral durante el periodo de grabación.

	Promedio	D. estándar
low freq	14.5	1.4
high freq	29.3	2
delta time	1.8	0.4
delta freq	4.8	2.4
peak freq	20.2	2.5

1.2.2. Señal Downsweep (Ds)

Se registraron un total de 1321 señales de la vocalización Ds de la ballena fin durante el periodo de estudio. La presencia de esta vocalización se detectó en 11 de los 13 meses de estudio (Fig. 16), con una tasa promedio de 0.10 vocalizaciones por hora. Diciembre de 2018 fue el mes con el mayor número de registros, alcanzando 0.48 vocalizaciones por hora, seguido por abril de 2018 y enero de 2018, con 0.19 y 0.17 vocalizaciones por hora, respectivamente (Tabla 11). Aunque los registros se concentraron principalmente durante el verano y el otoño (Fig. 17), no se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre las estaciones (*Test Kruskall,* X^2= 4.25, df: 2, *p*=0.12).

Por otro lado, la duración promedio de estas señales fue de 1 (± 0.1) segundo y en una frecuencia promedio entre 48.5 (±7.9) Hz y 86.7 (± 12.1) Hz (Tabla 12).

Tabla 11. Tasa de señales para la vocalización tipo Downsweep (Ds) de la ballena fin registrada mensualmente durante el periodo de grabación en la zona de la Isla Chañaral.

Mes	Vocalización/hora	Mes	Vocalización/hora
Dic-17	0.16	Jul-18	0.01
Ene-18	0.07	Ago-18	0.00
Feb-18	0.05	Dic-18	0.48
Mar-18	0.07	Ene-19	0.17
Abr-18	0.19	Feb-19	0.02
May-18	0.04	Mar-19	0.00
Jun-18	0.04		

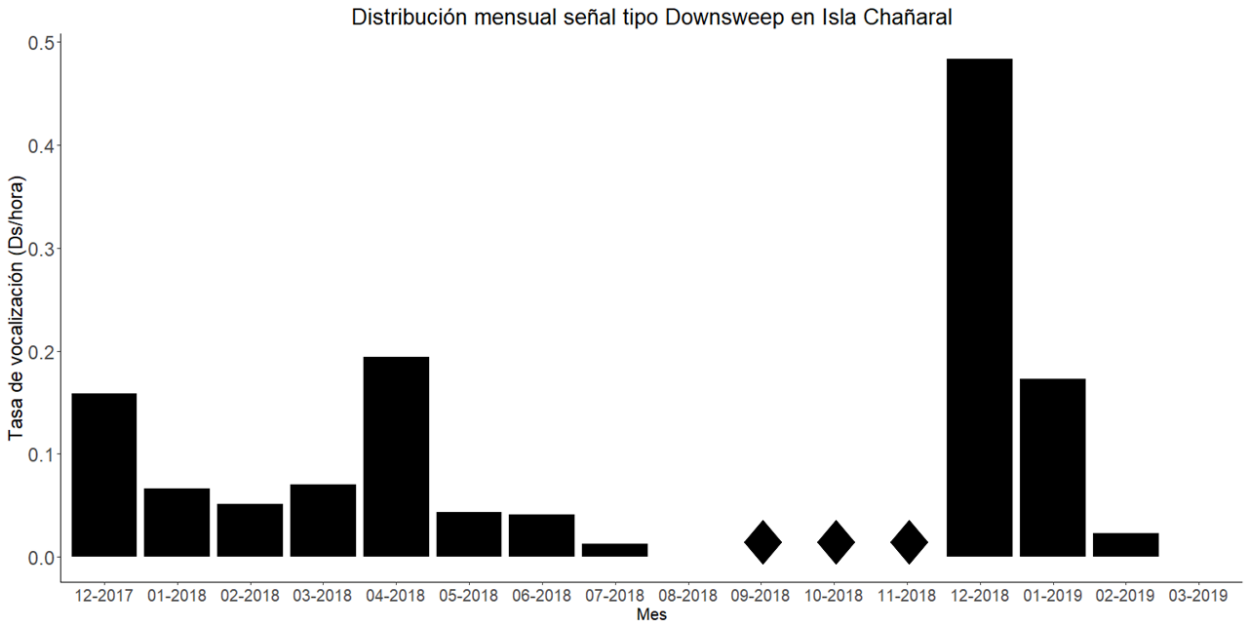


Figura 16. Distribución de la tasa de la señal Downsweep (Ds) (Vocalización/hora) registradas entre diciembre de 2017 y marzo de 2019 para la ballena fin en la zona de la Isla Chañaral, el símbolo ♦ indica las fechas donde no se realizaron grabaciones.

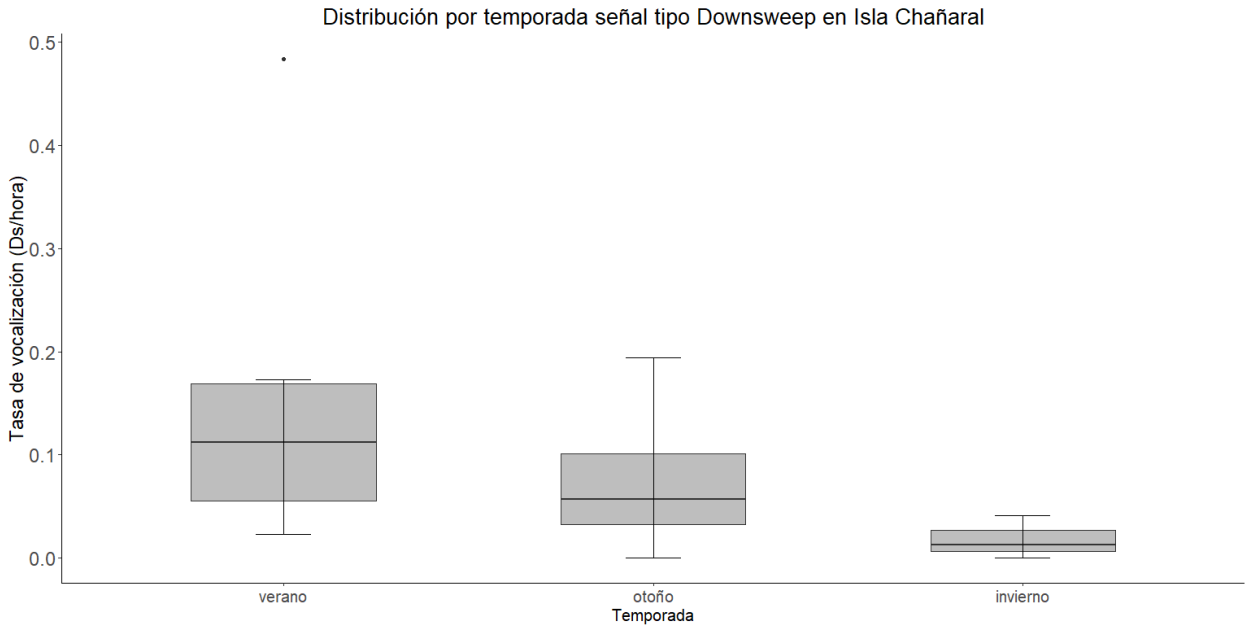


Figura 17. Distribución por temporada la tasa de vocalización de la señal Downsweep (Ds) (Vocalización/hora) de ballena fin en la zona de Isla Chañaral.

Tabla 12. Promedio y desviación estándar de las métricas analizadas para señales Downsweep (Ds) de la ballena fin en la zona de la Isla Chañaral durante el periodo de grabación.

	Promedio	D. estándar
low freq (Hz)	48.44	6.95
high freq (Hz)	87.58	9.94
delta time (s)	1.06	0.7
delta freq (Hz)	39.14	9.69
peak freq (Hz)	62.34	9.01

2. Caracterización del ruido antropogénico en aguas adyacentes a la Isla Chañaral.

La presencia acústica de origen antropogénica se observó a lo largo del periodo de estudio, en un 33% de la data completa. A modo de descripción la presencia antropogénica fue mayor durante febrero con un >45% del mes con presencia acústica antropogénica, por el contrario, junio fue el mes con el menor porcentaje de presencia acústica (19.89%) (Tabla 13, Fig. 18).

Estacionalmente, el verano presentó los mayores valores de presencia de señales antropogénicas (media: >40%), mientras que el invierno mostró la menor presencia antropogénica (media: 20.93%) (Fig. 19). Los resultados del ANOVA mostraron diferencias significativas para todas las temporadas ($F(2, 10) = 21.43$, p=0.000242).

Con respecto a la presencia de eventos antropogénicos en los patrones diarios durante el periodo de grabación, se obtuvo que la mayor probabilidad de presencia de registro al medio día (12:00), con un 9.78% y la mínima probabilidad fue a las 01:00 (0.48%) (Tabla 14, Fig. 20). Así mismo, la mayor probabilidad de presencia de estos eventos fue durante la tarde, con una mediana de 8.26%, junto con la mañana (7.4%), en comparación de la noche (0.65%) y el anochecer (0.97%) (Fig. 21). Se observa una diferencia significativa entre los periodos del día (*Test Kruskall*, X^2= 17.78, df=3, p=0.0004), un análisis posterior identifica que la diferencia se encuentra entre la noche con la mañana y tarde y entre la tarde con el anochecer (Tabla 15).

Tabla 13. Porcentaje mensual (%) de presencia antropogénica registrada durante el periodo de grabación en la zona de la Isla Chañaral durante el periodo de grabación.

Mes	% eventos antropogénicos	Mes	% eventos antropogénicos
Dic-17	34.59	Jul-18	21.30
Ene-18	41.78	Ago-18	21.63
Feb-18	47.58	Dic-18	37.63
Mar-18	35.35	Ene-19	38.84
Abr-18	25.97	Feb-19	45.98
May-18	28.49	Mar-19	35.22
Jun-18	19.86		

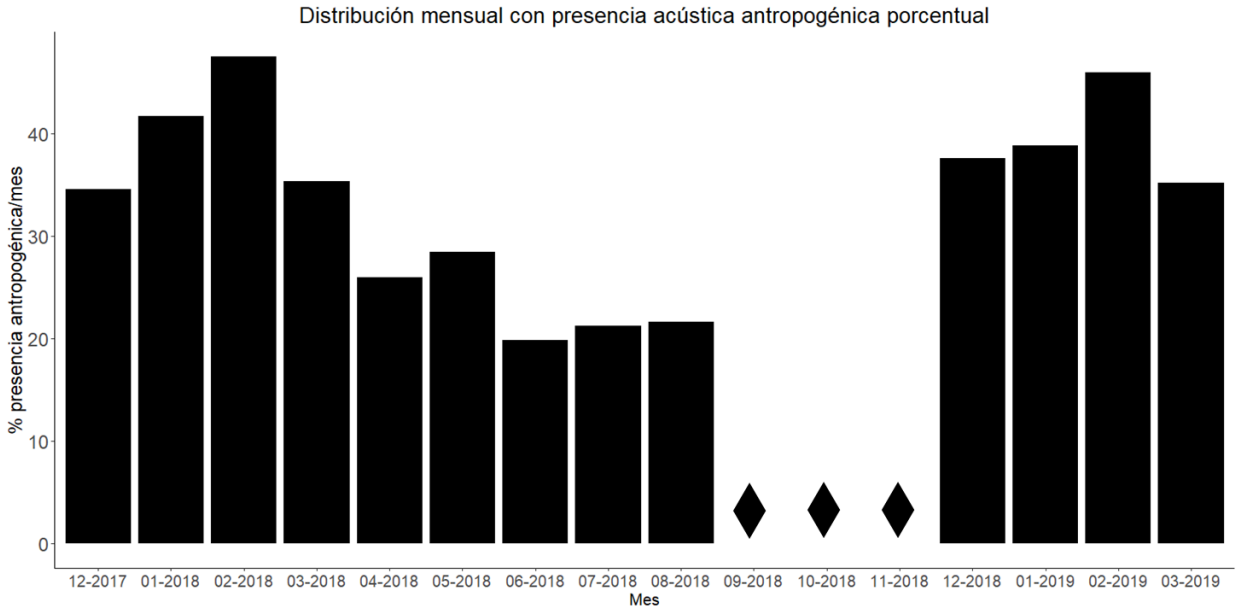


Figura 18. Distribución del porcentaje mensual (%) de presencia antropogénico entre diciembre de 2017 y marzo de 2019 en la zona de la Isla Chañaral, el símbolo ♦ indica las fechas donde no se realizaron grabaciones.

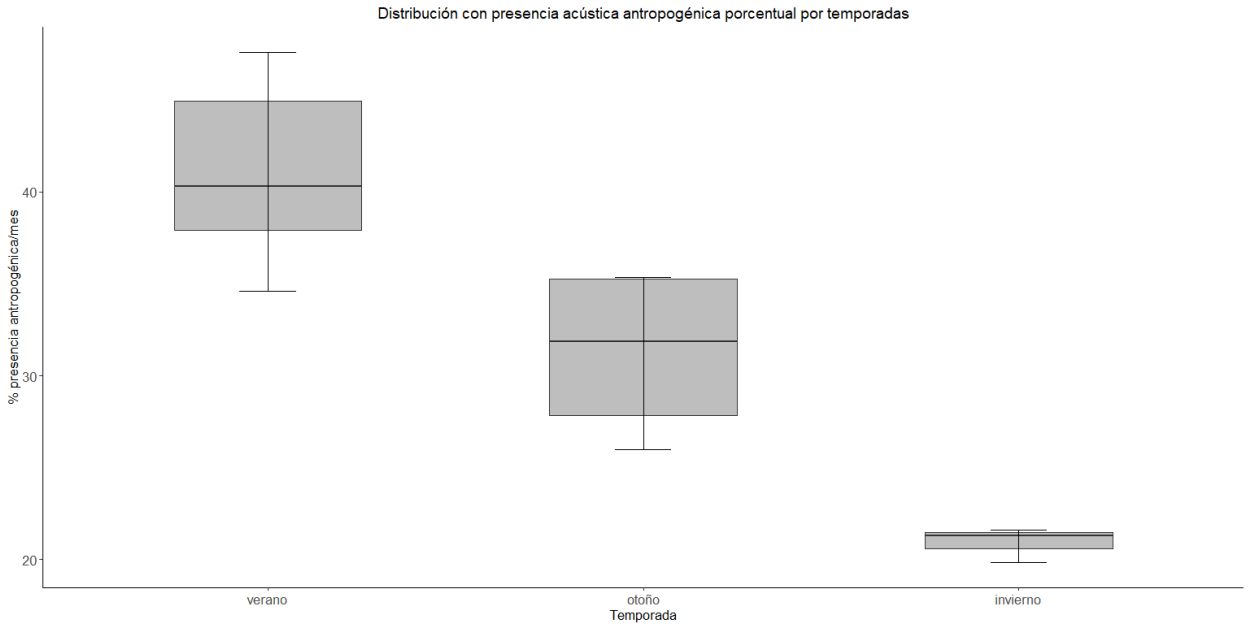


Figura 19. Distribución temporal del porcentaje mensual (%) de presencia de origen antropogénico en el área de la Isla Chañaral.

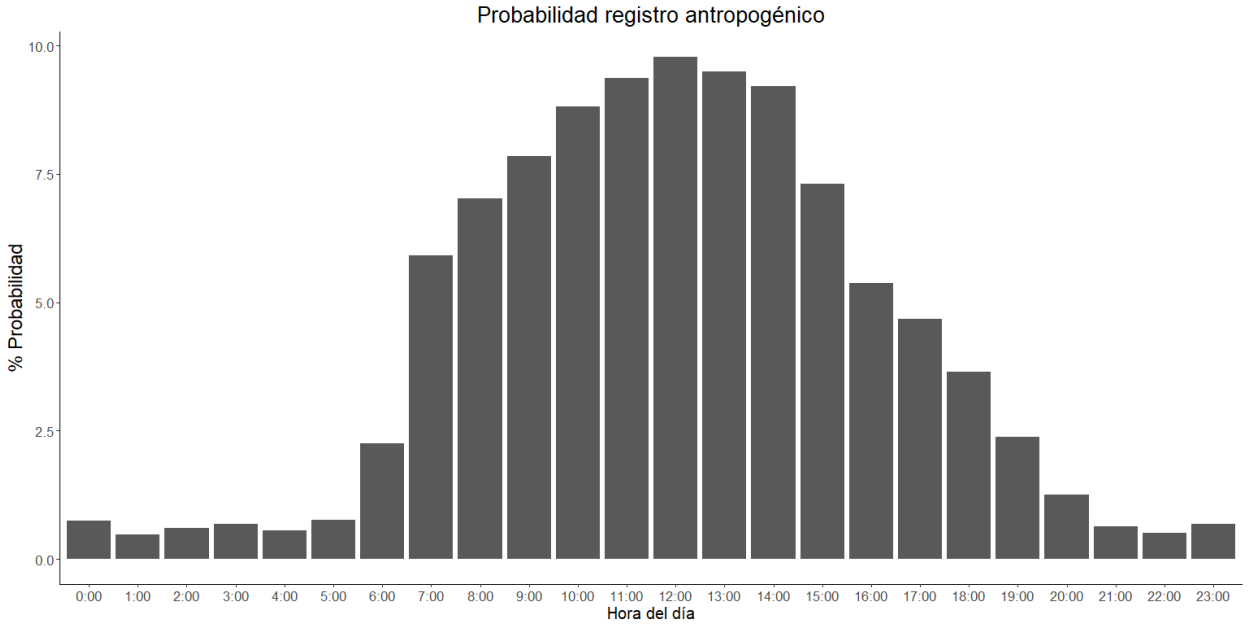


Figura 20. Distribución del la probabilidad de presencia porcentual (%) de la presencia de los eventos antropogénicos durante 24 horas.

Tabla 14. Probabilidad de presencia porcentual (%) durante cada hora por 24 horas en el periodo de grabación de la presencia de ruido antropogénico.

hora	Total	prob pres (%)	hora	Total	prob pres (%)
0:00	23	0.74	12:00	304	9.78
1:00	25	0.48	13:00	295	9.49
2:00	19	0.61	14:00	286	9.21
3:00	21	0.68	15:00	227	7.31
4:00	17	0.55	16:00	167	5.37
5:00	24	0.77	17:00	146	4.67
6:00	70	2.25	18:00	113	3.64
07:00	184	5.92	19:00	74	2.38
08:00	218	7.02	20:00	40	1.26
09:00	244	7.85	21:00	20	0.64
10:00	274	8.82	22:00	16	0.51
11:00	291	9.37	23:00	21	0.68

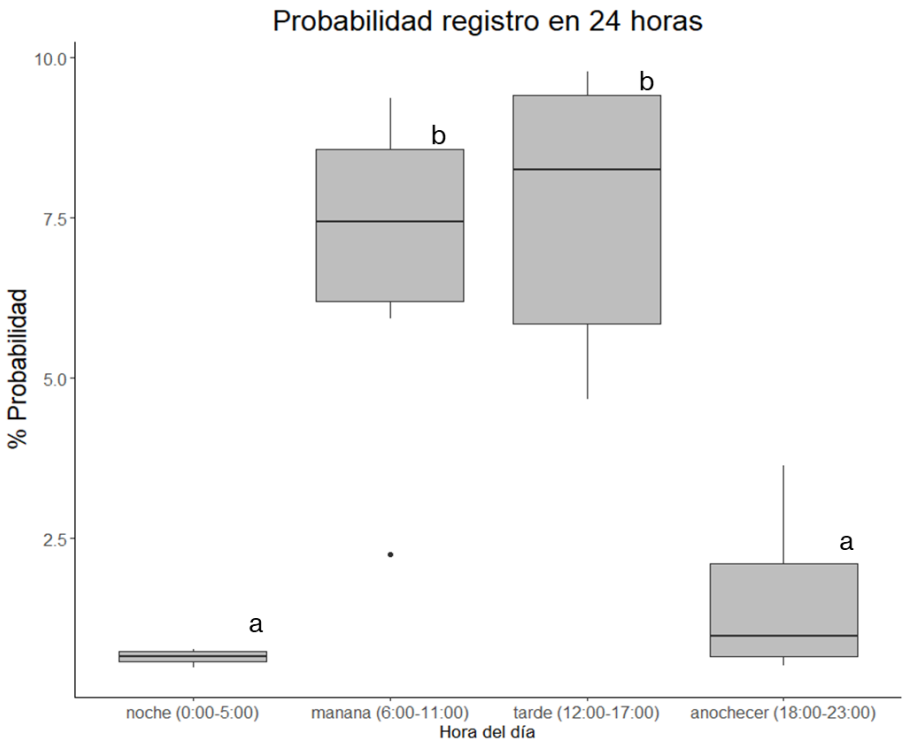


Figura 21. Probabilidad de presencia (%) de ruido de origen antropogénicos para cada periodo del día. Las letras a y b representan la similitud estadística.

Tabla 15. Tabla resumen de estadísticos por la prueba de Wilcoxon entre los periodos del día: noche (01:00-06:00), mañana (07:00-12:00), tarde (13:00-18:00), anochecer (19:00-23:00).

	Z	p-Valor	
noche -mañana	0	0.03	*
noche -tarde	0	0.03	*
noche -anochecer	14.5	1	
mañana -tarde	25.5	1	
mañana - anochecer	36	0.03	
tarde- anochecer	36	0.03	*
	*significancia		

3. Caracterización del sonido ambiente en aguas adyacentes a la Isla Chañaral.

Dada que la presencia antropogénica en la zona de la Isla Chañaral es significante en verano e invierno es que estas temporadas fueron utilizadas para la caracterización del sonido ambiental (NL) antropogénico.

La intensidad del sonido (SPL) natural para las temporadas naturales se registraron entre los 107 a 110 dB re 1 μPa (Tabla 14) y para el ambiente antropogénico entre 108 a 111 dB re 1 μPa con un nivel máximo registrado de 141 dB re 1 μPa (Tabla 16).

La medición de SPL para todas las temporadas presenta una diferencia significativa ($p < 0.05$), destacando que el nivel máximo registrado muestra la diferencia más notoria (Fig. 22). Además, un análisis realizado solo para las temporadas naturales también revela diferencias significativas entre ellas (X^2=186697; df=5, p=<2.2e^{-16}) (Fig. 23).

Una comparación para el verano natural y verano antropogénico muestra una diferencia significativa entre temporadas (X^2=21579, df = 1, p<2.2e^{-16}) (Fig. 24), lo mismo se encuentra para la comparación para el invierno (X^2=18358, df = 1, p<2.2e^{-16}) (Fig. 25).

Tabla 16. Resumen estadístico del análisis de la intensidad del sonido (SPL re 1 μPa) por estación, comparando natural y antropogénico.

	Natural		Antropogénico	
TEMPORADA	Media (dB)	Des. Est (±)	Media (dB)	Des. Est (±)
Verano	107.82	5.37	108.75	5.47
Otoño	110.13	6.61	-	-
Invierno	108.13	5.51	111.00	5.61
Nivel máximo registrado	-	-	141.38	6.16

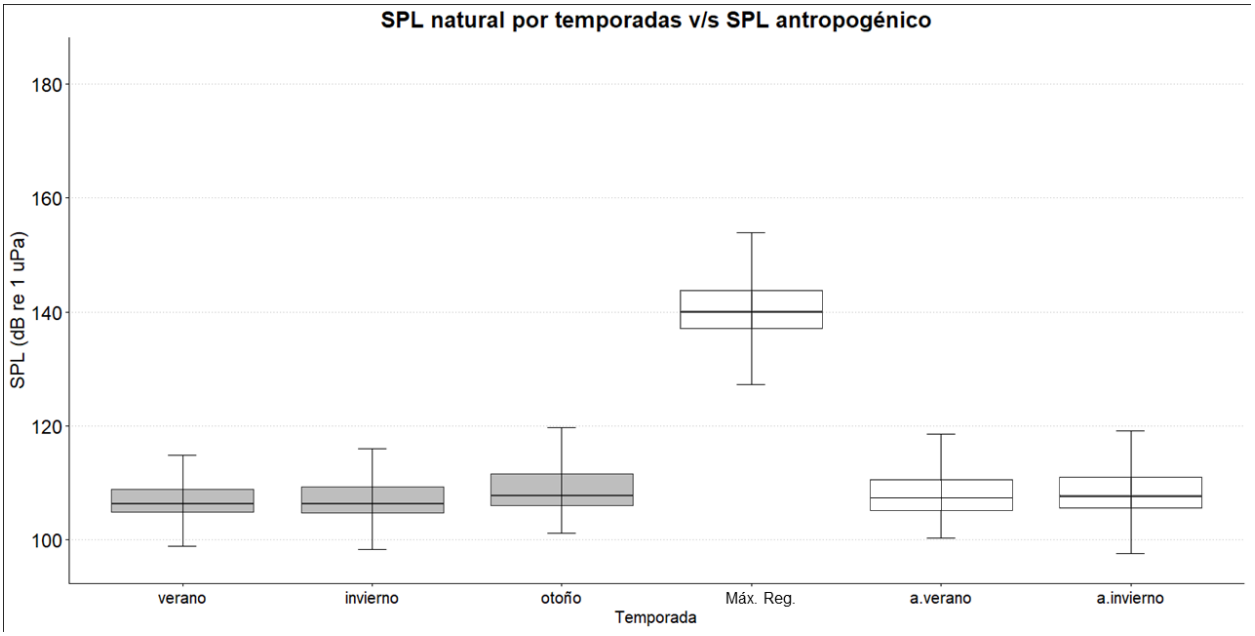


Figura 22. Diagrama de caja para SPL (dB re 1 µPa) de sonido ambiental natural (NL) para cada temporada, tanto en situaciones naturales como antropogénicas. Las cajas en gris corresponden temporada natural y cajas en blanco a sonido ambiente antropogénico.

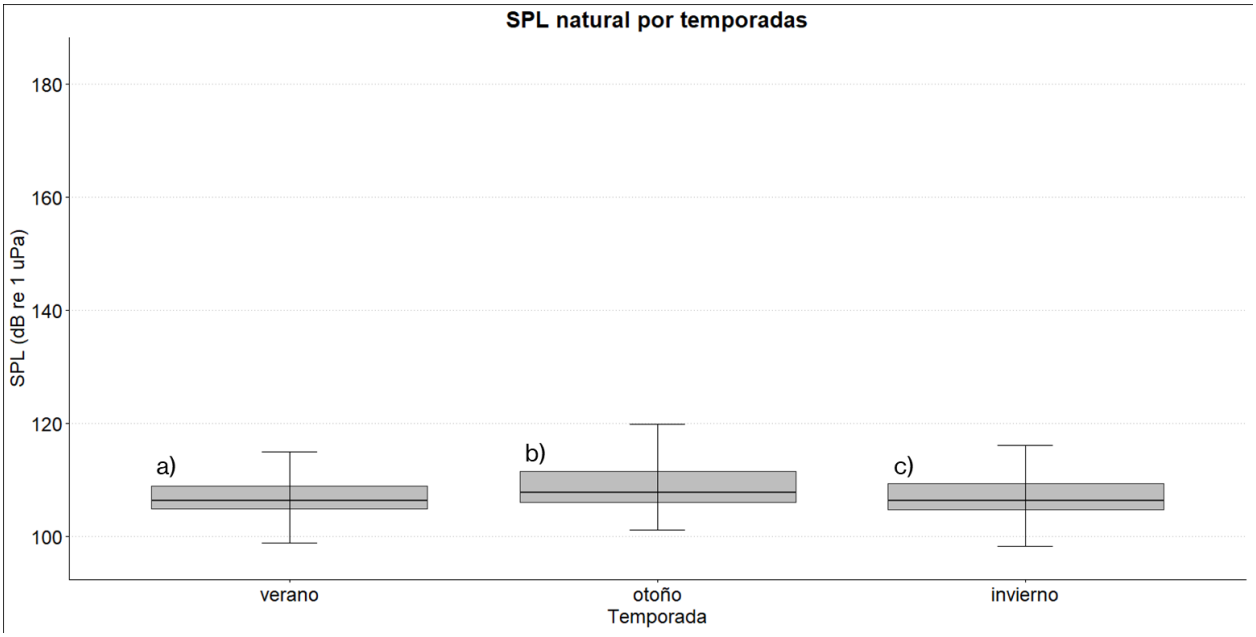


Figura 23. Diagrama de caja para SPL (dB re 1 µPa) de sonido ambiental natural (NL) para las temporadas naturales libre de sonido antropogénico. Las letras a, b y c representan la similitud estadística.

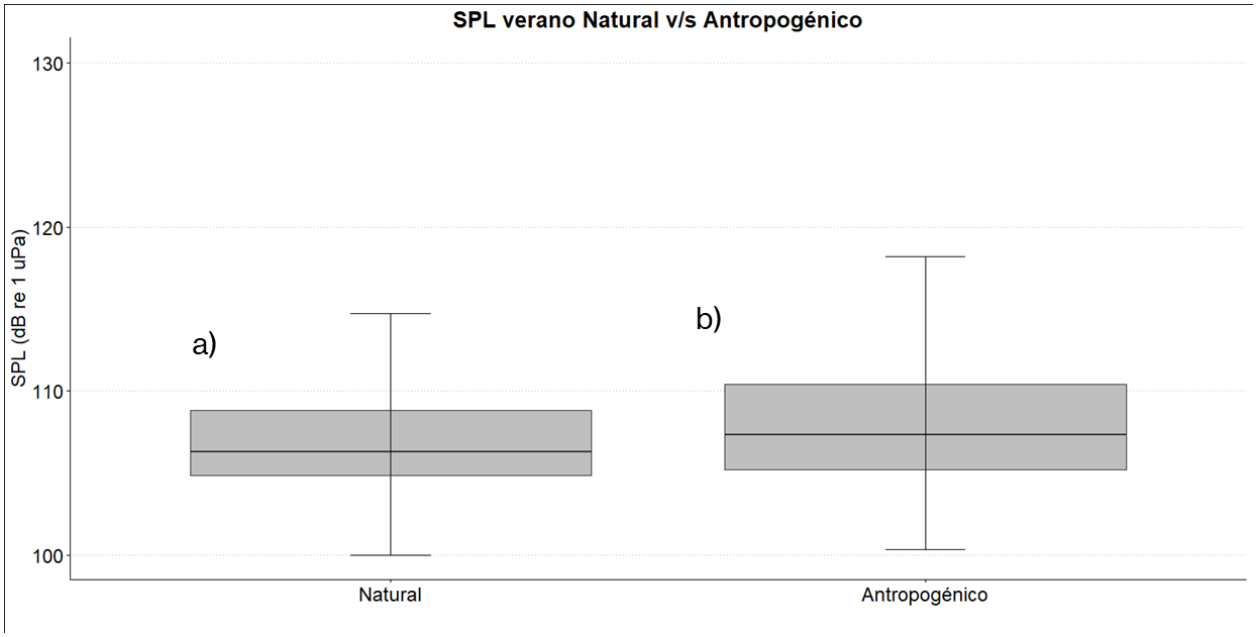


Figura 24. Diagrama de caja para SPL (dB re 1 µPa) para comparar verano natural con verano antropogénico. Las letras a y b representan la similitud estadística.

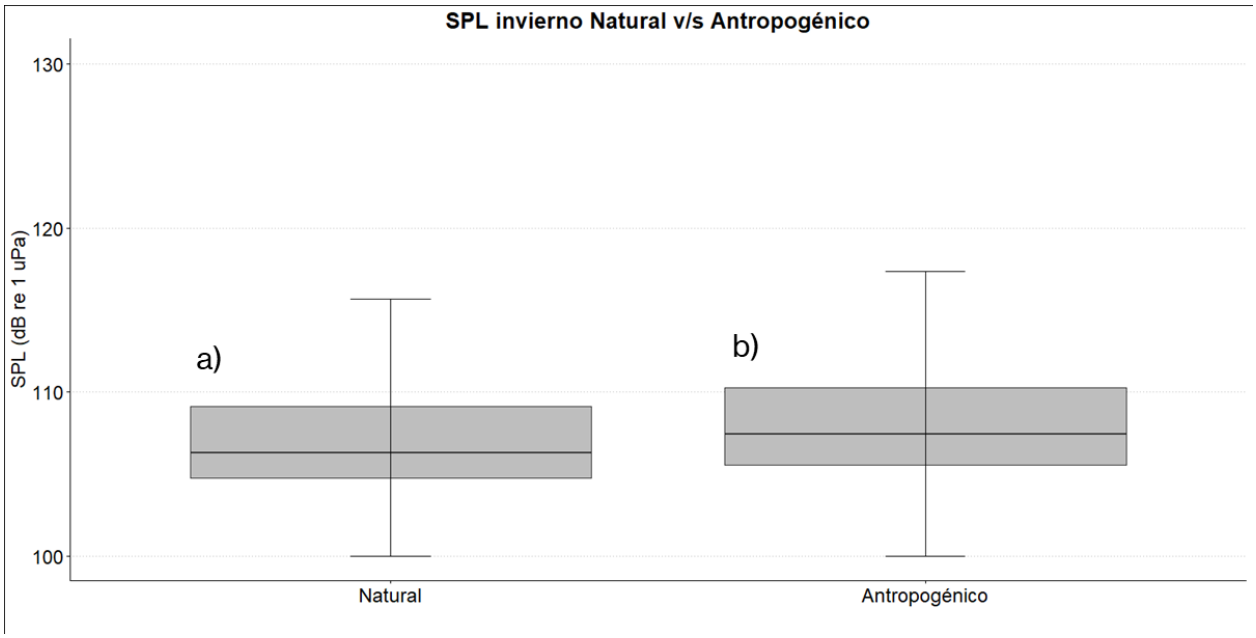


Figura 25. Diagrama de caja para SPL (dB re 1 µPa) para comparar invierno natural con invierno antropogénico. Las letras a y b representan la similitud estadística.

4. Estimación Espacio de Comunicación de las ballenas y el impacto del ruido antropogénico las aguas adyacentes a la Isla Chañaral.

4.1. Estimación del Espacio de Comunicación (CS) e impacto para la ballena azul.

El CS de la ballena azul vario durante el periodo de estudio. Para el modelamiento natural de la señal tipo SEP2 los valores máximos de amplitud de CS se dieron durante el verano con valores ~200 km2 y donde el otoño presenta el menor valor de amplitud con ~50 km^2 (Tabla 17) Por otro lado, el CS modelado bajo la influencia del ruido de origen antropogénico fue de 219 km^2 para el verano, 67 km^2 para el invierno y 0.38 km^2 para el máximo nivel registrado (Tabla 17).

La variación del CS para el verano fue de un aumento del 10% del área bajo condiciones antropogénicas (Fig. 26), a diferencia durante el invierno que se redujo un 47% (Tabla 18, Fig.

27). La variación bajo un máximo impacto entre el CS natural con el CS antropogénico fue de una reducción del 99% pasando de 128 km^2 a 0.38 km2 (Tabla 18, Fig. 28).

Tabla 17. Resumen de Rango de comunicación (CR; km) y Espacio de comunicación (CS; km^2) para la señal tipo SEP2 de la ballena azul bajo diversos escenarios en el área de la Isla Chañaral.

SEP2	CR (km)	CS (km^2)
Verano Natural	7.95	198.56
Otoño Natural	4.02	50.77
Invierno Natural	6.4	128.68
Verano antropogénico	8.35	219.04
Invierno antropogénico	4.65	67.93
Máximo nivel registrado	0.35	0.38

Tabla 18. Impacto (% variación) del espacio de comunicación de la ballena azul, mediante la señal SEP2 comparando los espacios de comunicación (CS) natural y antropogénico para el verano, invierno y máximo impacto.

Temporada	CS Natural	CS Antropogénico	Variación (%)
Verano	198.56 Km^2	219.04 Km^2	+10.31%
Invierno	128.68 Km^2	67.93 Km^2	-47.21%
Máximo impacto	128.7 Km^2	0.38 Km^2	-99.7%

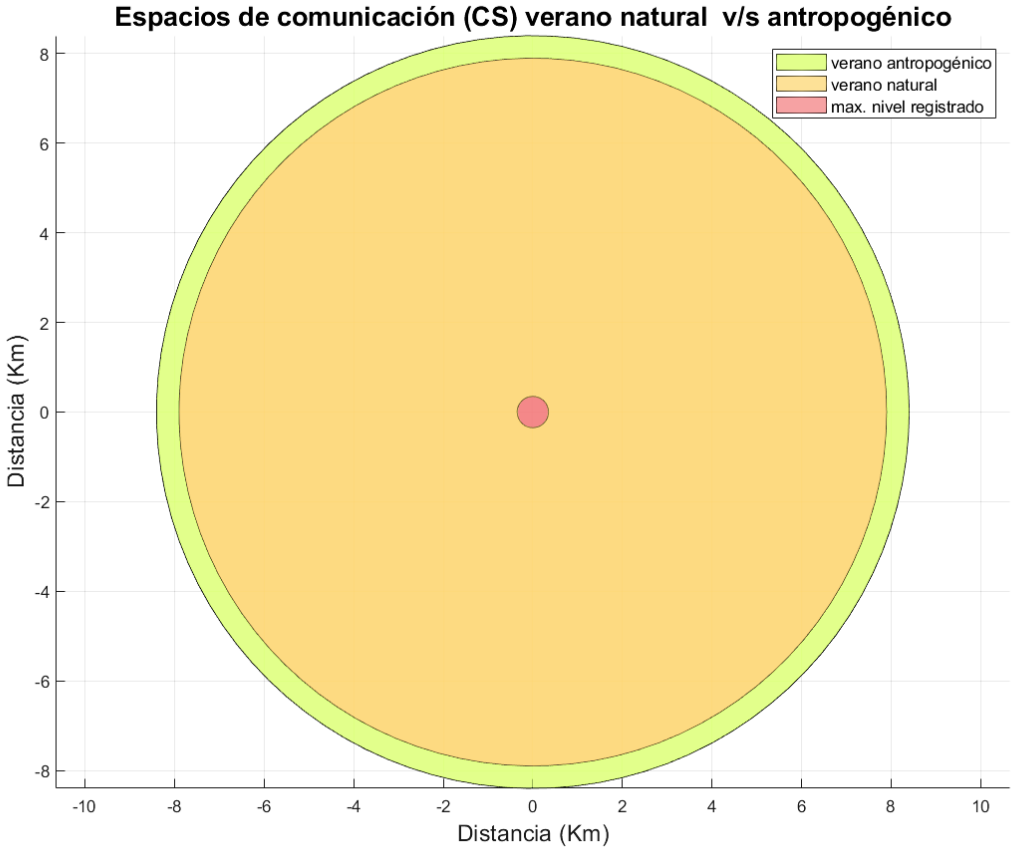


Figura 26. Representación bidimensional de la variación del Espacio de Comunicación (CS) para la señal tipo SEP2 de la ballena azul para el verano natural, antropogénico y el máximo impacto. El color amarillo corresponde al CS calculado para el verano natural, verde para verano con presencia antropogénica y rojo para el máximo nivel registrado.

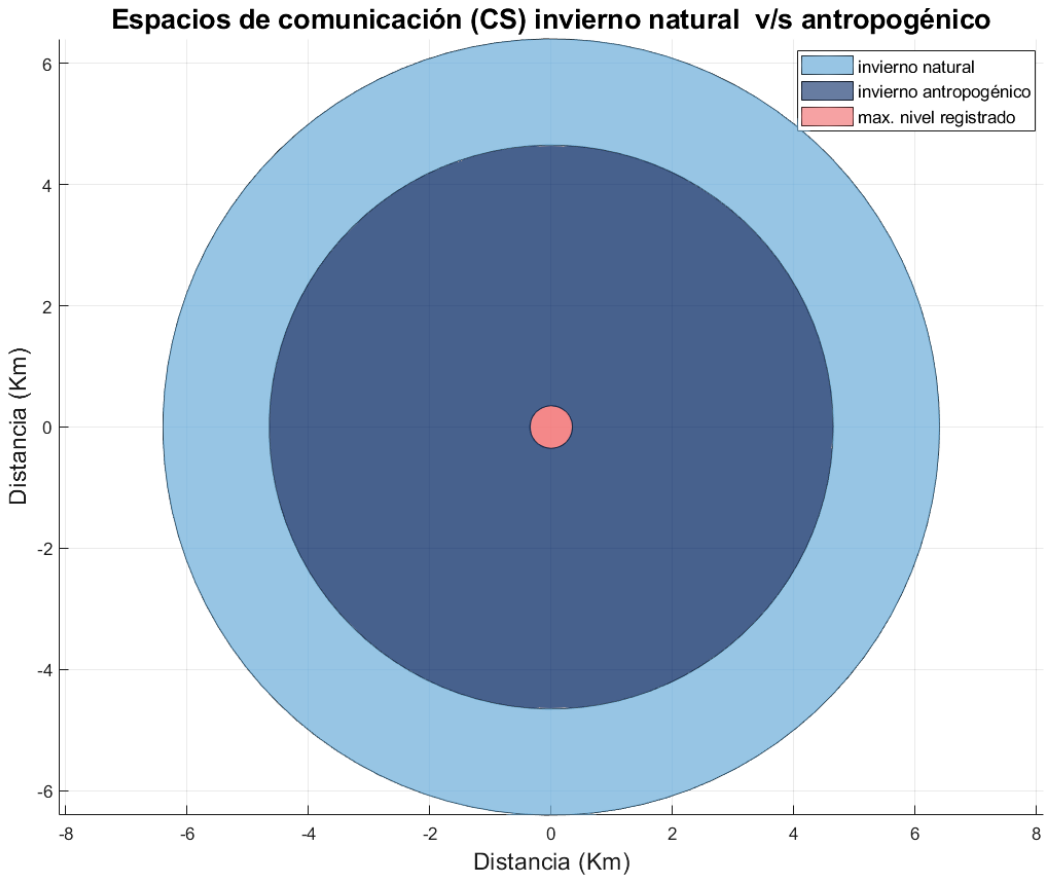


Figura 27. Representación bidimensional de la variación del Espacio de Comunicación (CS) para la señal tipo SEP2 de la ballena azul para el invierno natural, antropogénico y el máximo impacto. El color celeste corresponde al CS calculado para el verano natural, azul para verano con presencia antropogénica y rojo para el máximo nivel registrado.

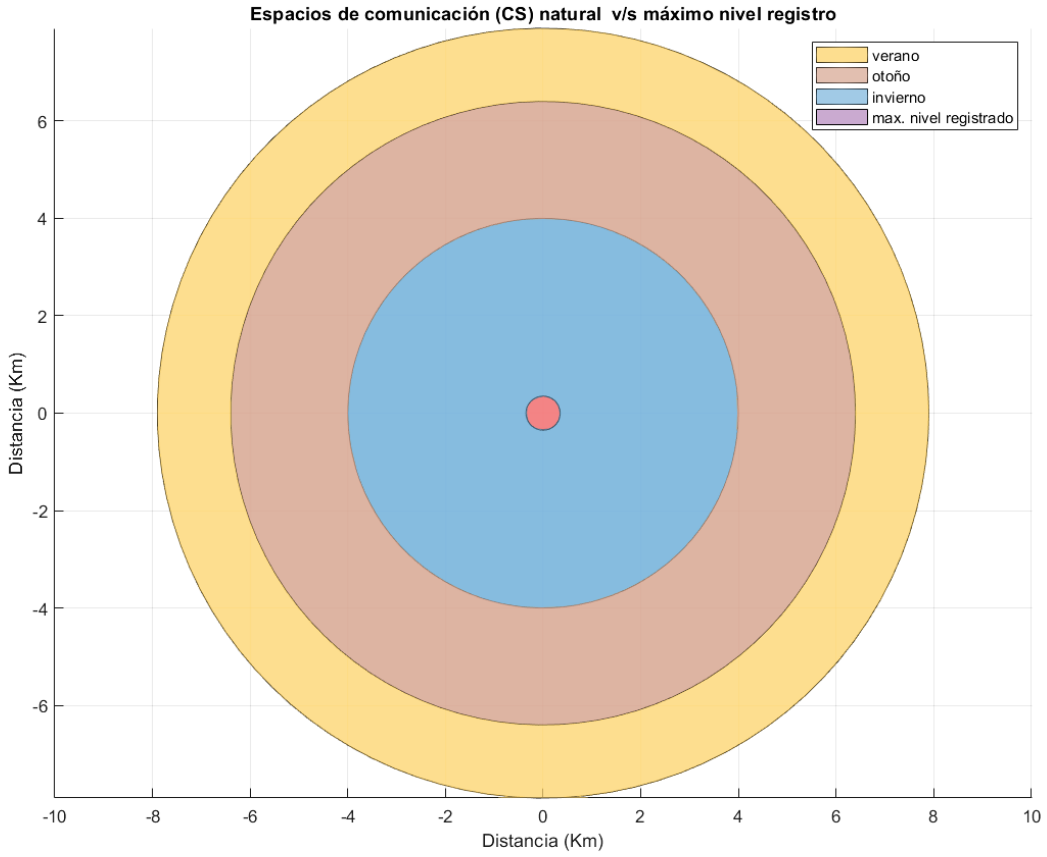


Figura 28. Representación bidimensional de la variación del Espacio de Comunicación (CS) para la señal tipo SEP2 de la ballena azul bajo condiciones naturales y de máximo impacto en el área de la Isla Chañaral. El color amarillo corresponde al CS calculado para el verano natural, rosa para otoño natural, celeste para invierno natural y rojo para el máximo nivel antropogénico registrado.

Para el modelamiento natural de la señal tipo Dcall los valores máximos de amplitud de CS se dieron durante el verano e invierno con 0.79 km^2 y donde el otoño presenta el menor valor de amplitud con 0.54 km^2 (Tabla 19) Por otro lado, el CS modelado bajo la influencia del ruido de origen antropogénico fue de 0.64 km^2 para el verano, 0.38 km^2 para el invierno y 0 km^2 para el máximo nivel registrado (Tabla 19).

La variación del CS para el verano fue de una disminución del 18% del área bajo condiciones antropogénicas (Fig. 29) y durante el invierno que se redujo un 51% (Tabla 20, Fig. 30). La variación bajo un máximo impacto entre el CS natural con el CS antropogénico fue de una reducción del 100% pasando de 0.71 km2 a 0 km2 (Tabla 20, Fig. 31).

Tabla 19. Impacto (% variación) del espacio de comunicación de la ballena azul, mediante la señal Dcall comparando los espacios de comunicación (CS) natural y antropogénico para el verano, invierno y máximo impacto.

Dcall	CR (km)	CS (km^2)
Verano Natural	0.5	0.79
Otoño Natural	0.4	0.54
Invierno Natural	0.5	0.79
Verano antropogénico	0.45	0.64
Invierno antropogénico	0.35	0.38
Máximo nivel registrado	0	0

Tabla 20. Impacto (% variación) del espacio de comunicación de la ballena azul, mediante la señal Dcall comparando los espacios de comunicación (CS) natural y antropogénico para el verano, invierno y máximo impacto.

Temporada	CS Natural	CS Antropogénico	Variación (%)
Verano	0.79 Km²	0.64 Km²	-18.98%
Invierno	0.79 Km²	0.38 Km²	-51.89%
Máximo impacto	0.71 Km²	0 Km²	-100%

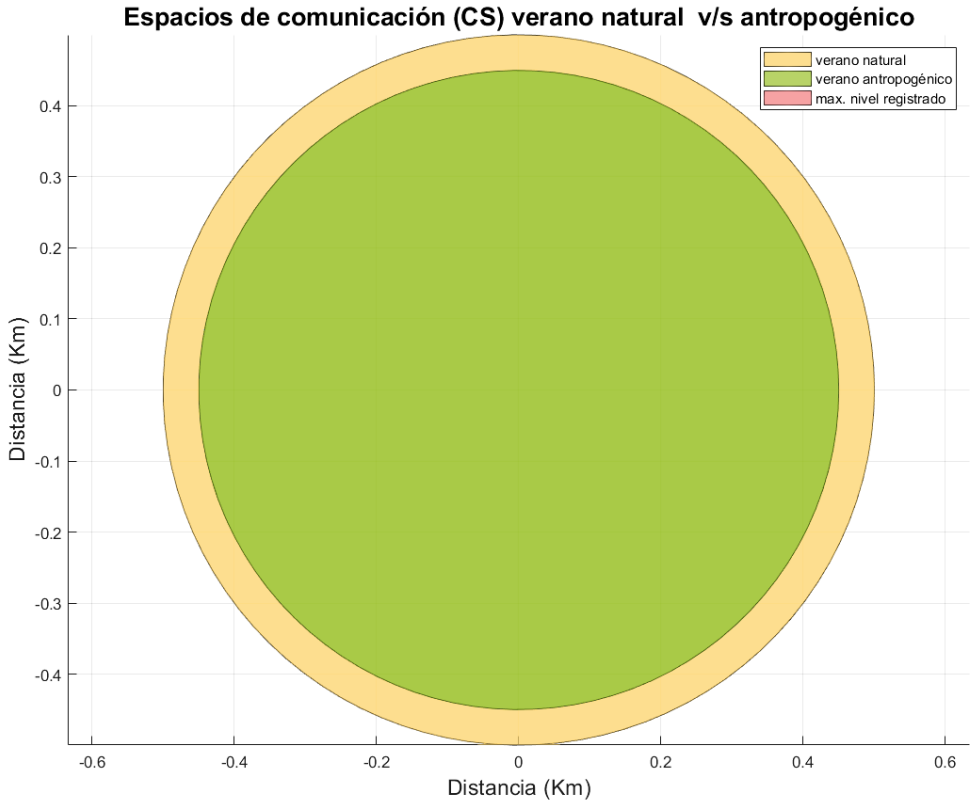


Figura 29. Representación bidimensional de la variación del Espacio de Comunicación (CS) para la señal tipo Dcall de la ballena azul para el verano natural, antropogénico y el máximo impacto. El color amarillo corresponde al CS calculado para el verano natural, verde para verano con presencia antropogénica y rojo para el máximo nivel registrado.

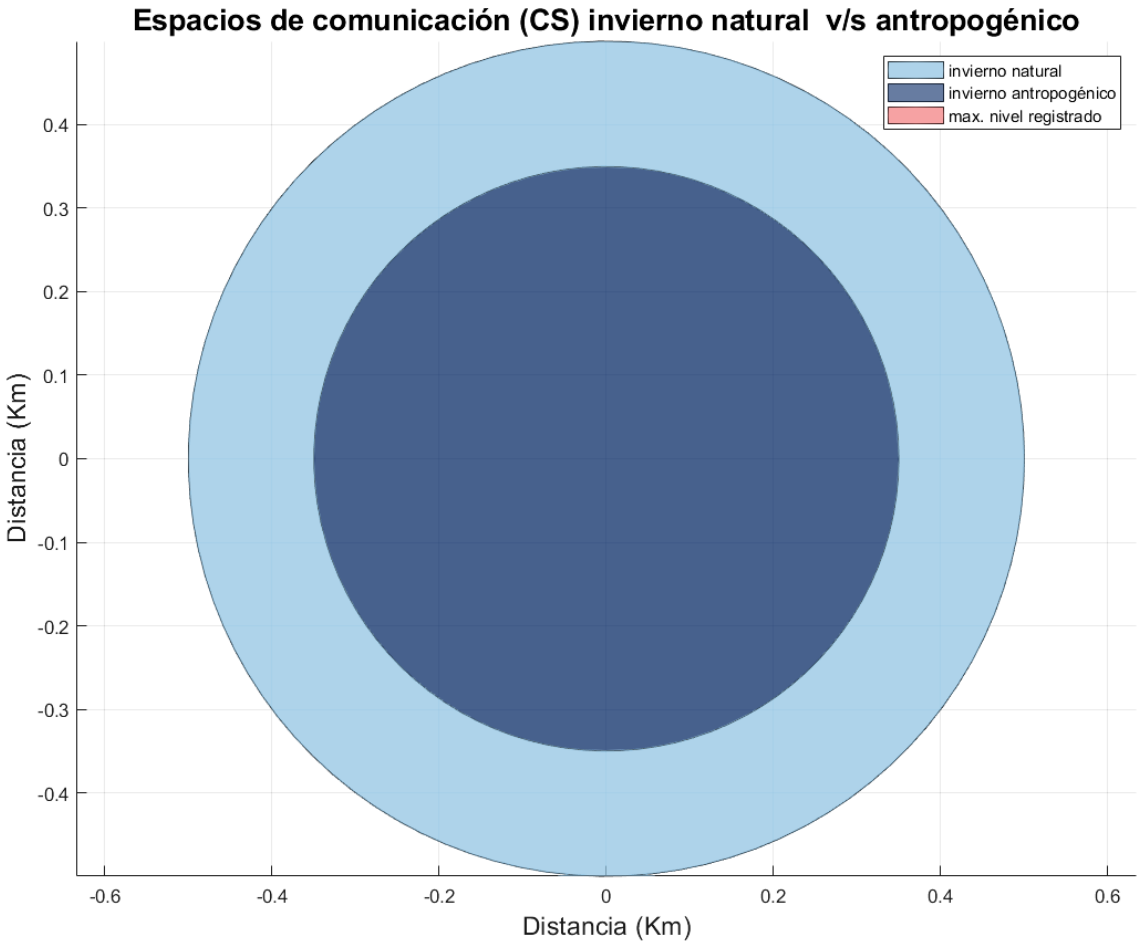


Figura 30. Representación bidimensional de la variación del Espacio de Comunicación (CS) para la señal tipo Dcall de la ballena azul para el invierno natural, antropogénico y el máximo impacto. El color celeste corresponde al CS calculado para el verano natural, azul para verano con presencia antropogénica y rojo para el máximo nivel registrado.

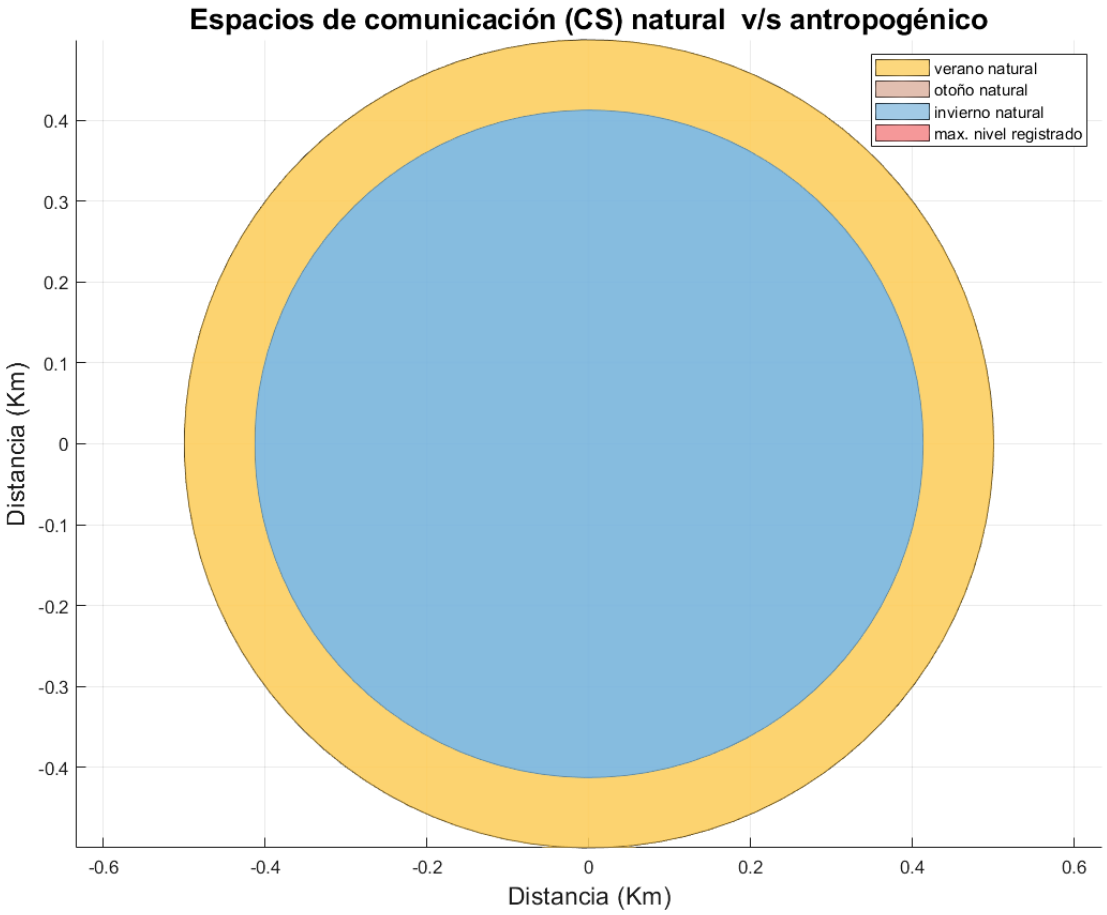


Figura 31. Representación bidimensional de la variación del Espacio de Comunicación (CS) para la señal tipo Dcall de la ballena azul bajo condiciones naturales y de máximo impacto en el área de la Isla Chañaral. El color amarillo corresponde al CS calculado para el verano natural, rosa para otoño natural, celeste para invierno natural y rojo para el máximo nivel antropogénico registrado.

4.2. Estimación del espacio de comunicación (CS) e impacto para la ballena fin.

El CS para ballena fin al igual que la ballena azul presentó una variabilidad de amplitud para las señales analizadas. Para el modelamiento natural de la señal tipo 20 Hz los valores máximos de amplitud de CS se dieron durante el verano e invierno >1000 km^2 y donde el otoño presenta el menor valor de amplitud (Tabla 21) Por otro lado, el CS modelado bajo la influencia del ruido de origen antropogénico fue de 1527 km^2 para el verano, 850 km^2 para el invierno y 8 km^2 para el máximo nivel registrado (Tabla 21).

La variación del CS para el verano fue de un aumento del 5% del área bajo condiciones antropogénicas (Fig. 32) y durante el invierno que se redujo un 28% (Tabla 22, Fig. 33). La variación bajo un máximo impacto entre el CS natural con el CS antropogénico fue de una reducción del 99% pasando de 1084 km2 a 8 km2 (Tabla 22, Fig. 34).

Tabla 21. Impacto (% variación) del espacio de comunicación de la ballena fin, mediante la señal 20 Hz comparando los espacios de comunicación (CS) natural y antropogénico para el verano, invierno y máximo impacto.

20 Hz	CR (km)	CS (km^2)
Verano Natural	21.5	1452.2
Otoño Natural	14.84	619.5
Invierno Natural	19.4	1182.37
Verano antropogénico	22.05	1527.45
Invierno antropogénico	16.45	850.12
Máximo nivel registrado	1.6	8.04

Tabla 22. Impacto (% variación) del espacio de comunicación de la ballena fin, mediante la señal 20 Hz comparando los espacios de comunicación (CS) natural y antropogénico para el verano, invierno y máximo impacto.

Temporada	CS Natural	CS Antropogénico	Variación (%)
Verano	1452.2 Km²	1527.45 Km²	+5.18%
Invierno	1182.37 Km²	850.12 Km²	-28.1%
Máximo impacto	1084.69 Km²	8.04 Km²	-99.26%

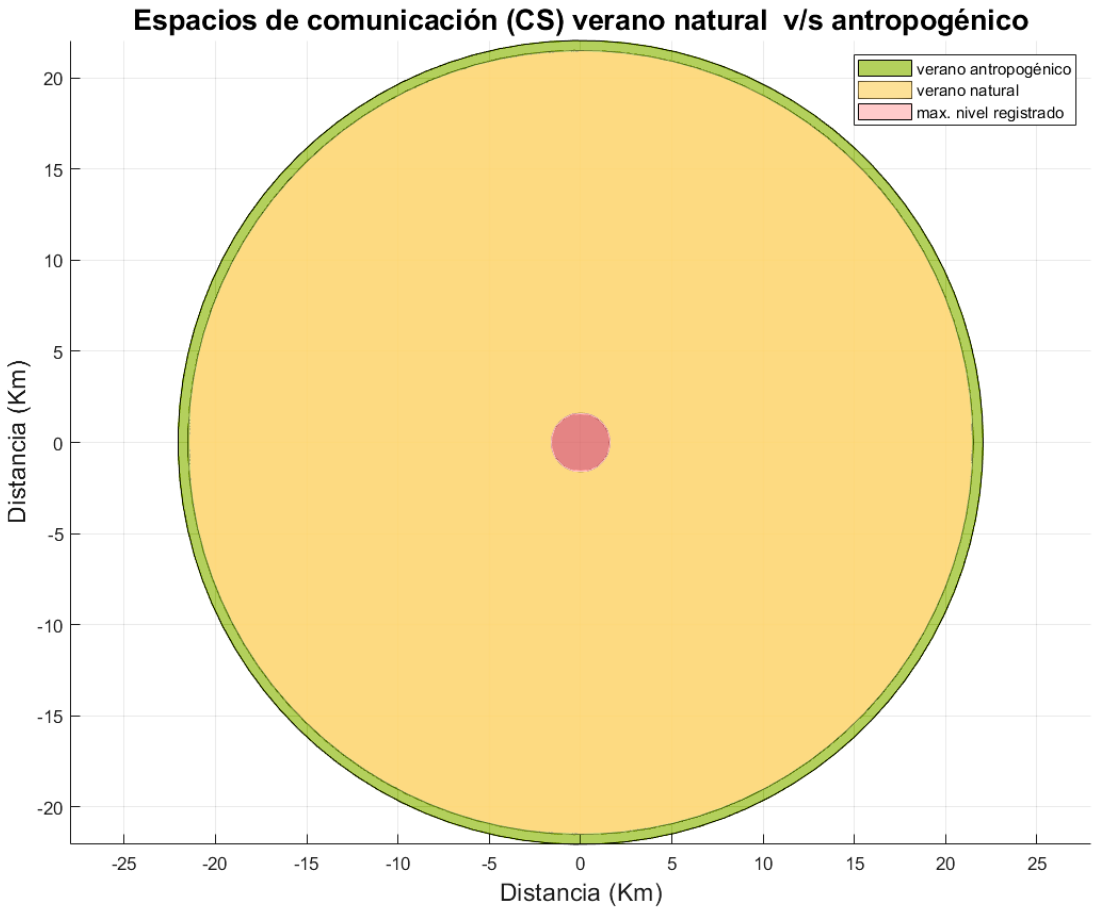


Figura 32. Representación bidimensional de la variación del Espacio de Comunicación (CS) para la señal tipo 20 Hz de la ballena fin para el verano natural, antropogénico y el máximo impacto. El color amarillo corresponde al CS calculado para el verano natural, verde para verano con presencia antropogénica y rojo para el máximo nivel registrado.

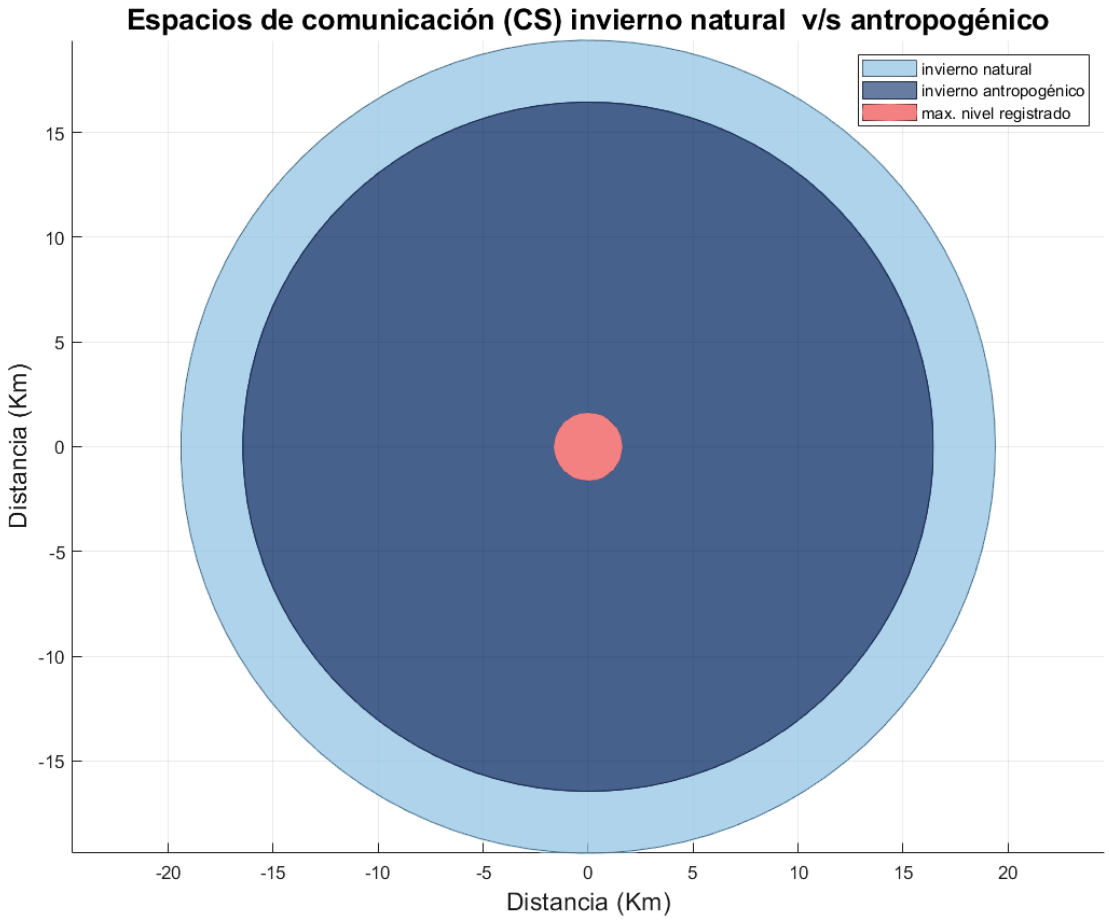


Figura 33. Representación bidimensional de la variación del Espacio de Comunicación (CS) para la señal tipo 20 Hz de la ballena fin para el invierno natural, antropogénico y el máximo impacto. El color celeste corresponde al CS calculado para el verano natural, azul para verano con presencia antropogénica y rojo para el máximo nivel registrado.

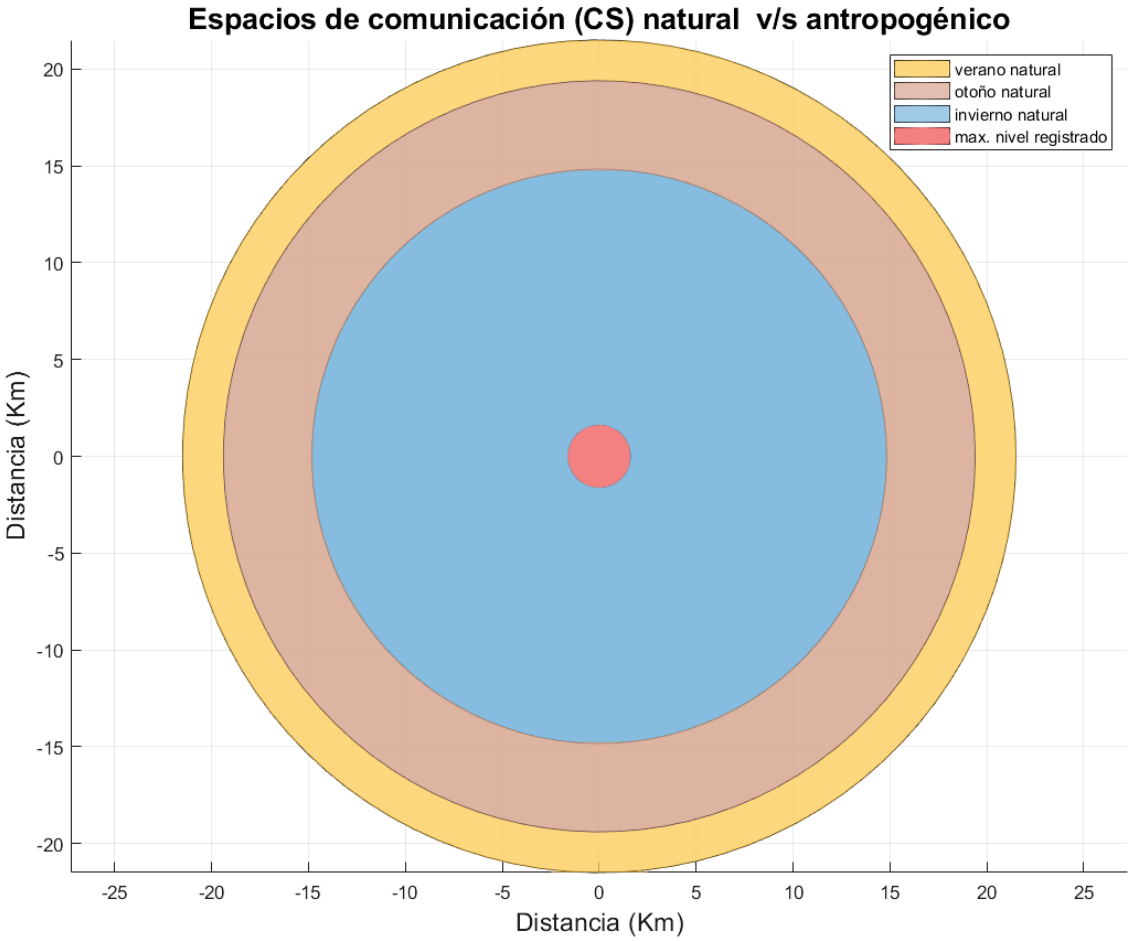


Figura 34. Representación bidimensional de la variación del Espacio de Comunicación (CS) para la señal tipo 20 Hz de la ballena fin bajo condiciones naturales y de máximo impacto en el área de la Isla Chañaral. El color amarillo corresponde al CS calculado para el verano natural, rosa para otoño natural, celeste para invierno natural y rojo para el máximo nivel antropogénico registrado.

Para el modelamiento natural de la señal tipo dowsweep (Ds) los valores máximos de amplitud de CS se dieron durante el verano con 7 km^2 y donde el otoño presenta el menor valor de amplitud con 5 km^2 (Tabla 23) Por otro lado, el CS modelado bajo la influencia del ruido de origen antropogénico fue de 6 km2 para el verano, 4 km^2 para el invierno y 0 km^2 para el máximo nivel registrado (Tabla 23).

La variación del CS para el verano fue de una disminución del 12% del área bajo condiciones antropogénicas (Fig. 35) y durante el invierno que se redujo un 31% (Tabla 22, Fig. 36). La variación bajo un máximo impacto entre el CS natural con el CS antropogénico fue de una reducción del 100% pasando de 0.71 km^2 a 0 km^2 (Tabla 24, Fig.37).

Tabla 23. Impacto (% variación) del espacio de comunicación de la ballena fin, mediante la señal Downsweep (Ds) comparando los espacios de comunicación (CS) natural y antropogénico para el verano, invierno y máximo impacto.

Ds	CR (km)	CS (km^2)
Verano Natural	1.5	7.07
Otoño Natural	1.359	5.8
Invierno Natural	1.45	6.61
Verano antropogénico	1.4	6.19
Invierno antropogénico	1.2	4.52
Máximo nivel registrado	0	0

Tabla 24. Impacto (% variación) del espacio de comunicación de la ballena fin, mediante la señal Downsweep (Ds) comparando los espacios de comunicación (CS) natural y antropogénico para el verano, invierno y máximo impacto.

Temporada	CS Natural	CS Antropogénico	Variación (%)
Verano	7.07 Km²	6.19 Km²	-12.44%
Invierno	6.61 Km²	4.52 Km²	-31.62%
Máximo impacto	6.49 Km²	0 Km²	-100%

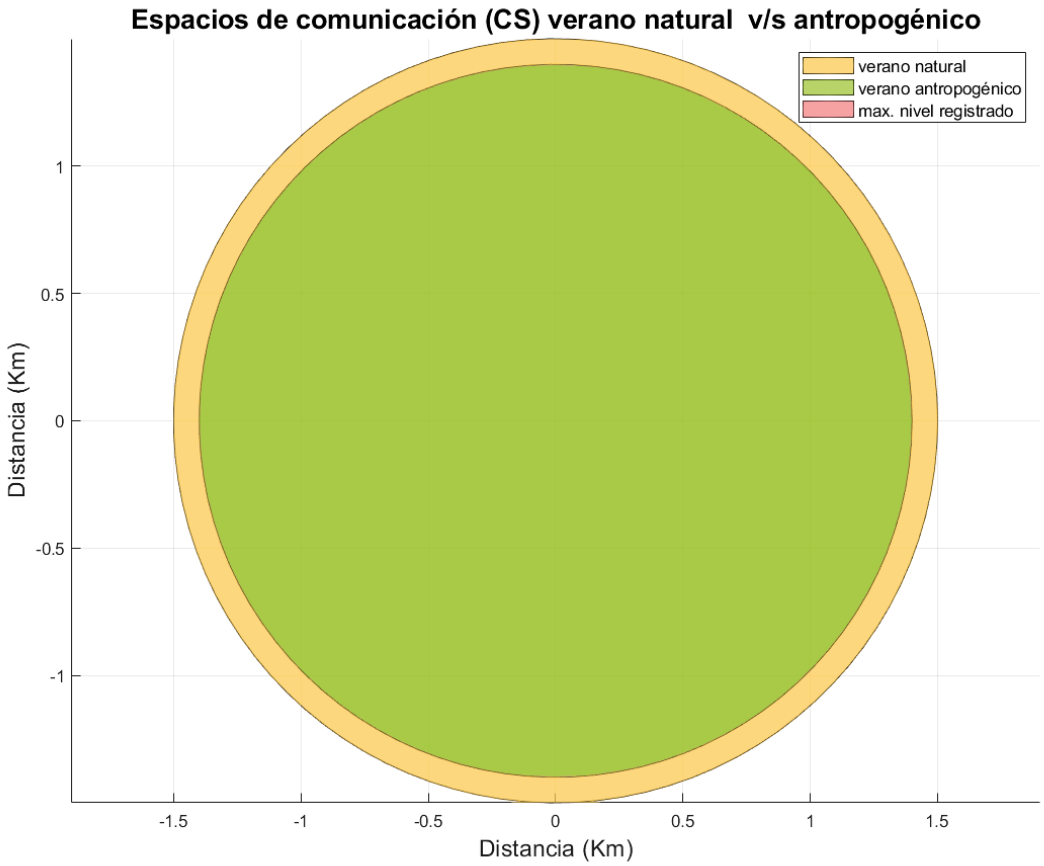


Figura 35. Representación bidimensional de la variación del Espacio de Comunicación (CS) para la señal tipo Downsweep (Ds) de la ballena fin para el verano natural, antropogénico y el máximo impacto. El color amarillo corresponde al CS calculado para el verano natural, verde para verano con presencia antropogénica y rojo para el máximo nivel registrado.

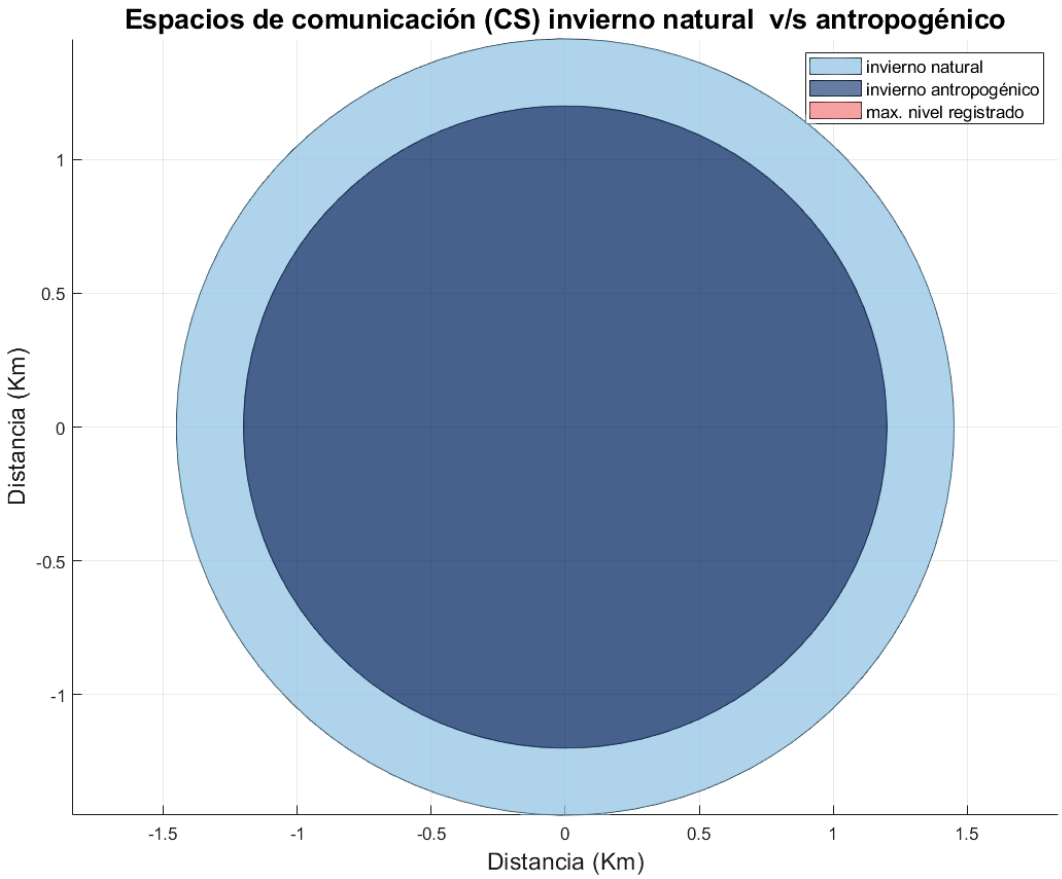


Figura 36. Representación bidimensional de la variación del Espacio de Comunicación (CS) para la señal tipo Downsweep (Ds) de la ballena fin para el invierno natural, antropogénico y el máximo impacto. El color celeste corresponde al CS calculado para el verano natural, azul para verano con presencia antropogénica y rojo para el máximo nivel registrado.

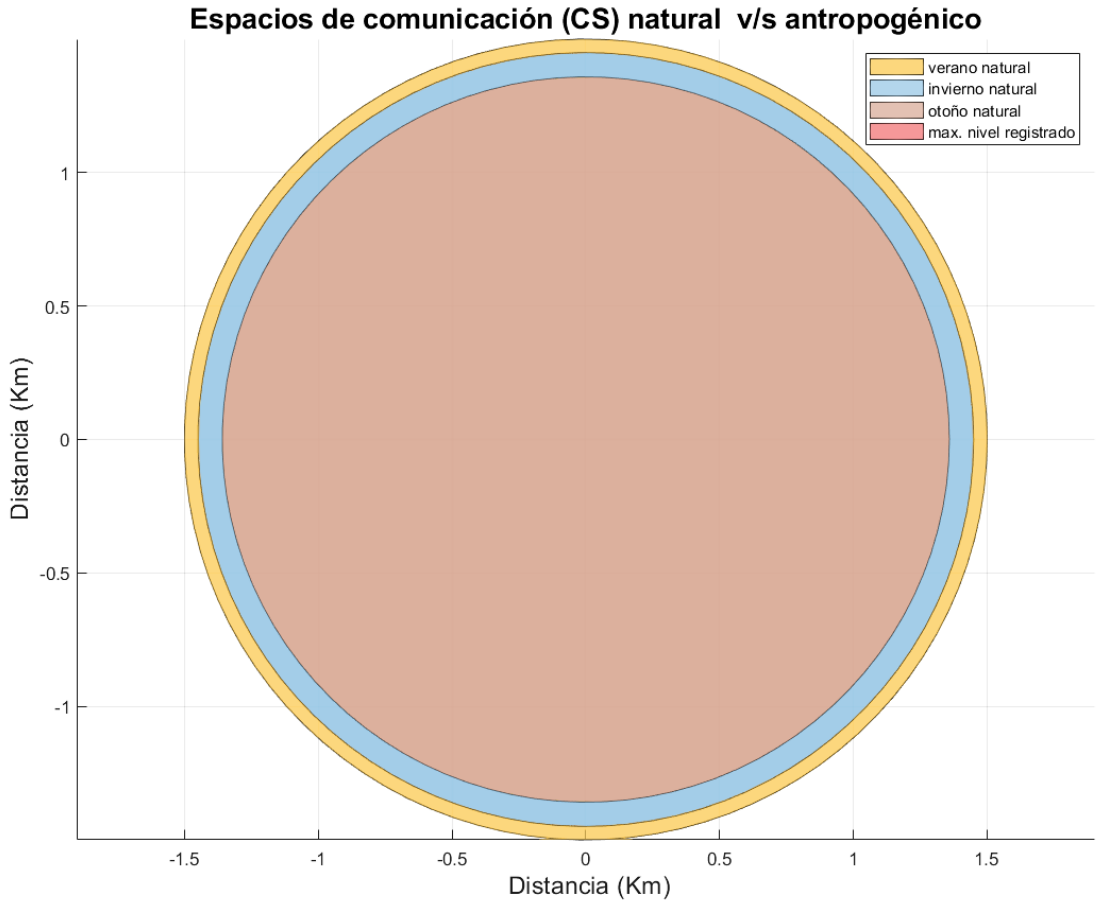


Figura 37. Representación bidimensional de la variación del Espacio de Comunicación (CS) para la señal tipo Downsweep (Ds) de la ballena fin bajo condiciones naturales y de máximo impacto en el área de la Isla Chañaral. El color amarillo corresponde al CS calculado para el verano natural, rosa para otoño natural, celeste para invierno natural y rojo para el máximo nivel antropogénico registrado.

IV. DISCUSION

El presente estudio evaluó el impacto del ruido antropogénico, particularmente el generado por embarcaciones menores, en el espacio de comunicación de las ballenas azules y fin en la zona de la Isla Chañaral, perteneciente al Archipiélago de Humboldt. Este trabajo caracterizó la presencia biológica, antropogénica y ambiental durante el período de 13 meses entre diciembre de 2017 y marzo de 2019. Asimismo, se estimó el espacio de comunicación de las ballenas, considerando cuatro tipos de vocalizaciones existentes en la zona, bajo tres escenarios distintos: el primero, natural sin la presencia antropogénica; el segundo, antropogénico con la presencia de embarcaciones; y el tercero, en un escenario de máximo impacto con la peor condición de ruido identificada en la zona. Esto permitió comparar los espacios de comunicación (CS) naturales y antropogénicos para evaluar el impacto de este último.

1. La presencia de las ballenas en aguas adyacentes a la Isla Chañaral, Archipiélago de Humboldt

Nuestros resultados identifican una presencia estacional marcada, durante del verano, de la presencia de la ballena azul. Esto se condice según los patrones migratorios descritos en el hemisferio sur, las poblaciones de ballena azul y ballena fin se pueden encontrar en las costas de Chile durante los meses de verano austral, otoño e incluso invierno (Abramson & Gibbons, 2010; Acevedo et al., 2012; Försterra & Häussermann, 2012; Hucke-Gaete et al., 2018; Sepúlveda et al., 2018; Toro et al., 2016; Torres-Florez et al., 2015). En el caso de la ballena azul, la señal SEP2 se ha observado en la zona aproximadamente entre diciembre y abril, lo cual coincide con registros en la misma zona (Alosilla, 2019) y más al sur de Chile, específicamente en la zona de Chiloé (Buchan et al., 2014, 2021; Redaelli et al., 2022). Curiosamente, se ha observado un desfase entre la zona centro-norte de Chile y la zona más patagónica, donde se registraron más vocalizaciones entre marzo y junio, mientras que en la zona centro-norte la tendencia es mayor en enero y febrero.

Por otro lado, en cuanto a la señal tipo Dcall, se puede observar una duración muy marcada de dos meses durante el verano. Este tipo de señal se asocia con comportamientos relacionados con el forrajeo, la alimentación y/o la sociabilización (Lewis et al., 2018; Oleson et al., 2007), lo que sugiere que su presencia puede indicar estos tipos de comportamientos en la zona de Isla Chañaral. Que la señal se presenten solo en verano podría indicar que este sea un lugar de paso en el trayecto hacia aguas de más altas latitudes, como la zona de Chiloé, donde se registra una mayor presencia de esta vocalización durante el verano tardío (Buchan et al., 2021).

En cuanto a la ballena fin, la totalidad de los registros acústicos de la señal de 20 Hz se encontraron durante el invierno, lo cual coincide con lo reportado en la literatura para ambos hemisferios (Schall et al., 2019; Širović et al., 2013; W. Watkins, 1981). Además, Buchan et al. (2019) reporta un aumento de registros de esta señal en la zona de Juan Fernández, con una ausencia paulatina en verano y un máximo en invierno. Esta vocalización se relaciona con la comunicación para la reproducción, búsqueda o encuentro de parejas reproductivas y es emitida únicamente por los machos (Croll et al., 2002; McDonald et al., 1995) sugiriendo que la época reproductiva de esta especie se produce en los meses de invierno. Por otro lado, la baja intensidad de estas vocalizaciones y la característica de que las vocalizaciones a baja frecuencia se transmiten a grandes distancias podrían indicar que estos registros no necesariamente se originan en el área de la reserva, sino que podrían provenir de lugares más distantes.

Para la señal tipo Ds, estos se registraron prácticamente durante todo el año, y según lo reportado por Širović et al. (2013), en el hemisferio norte se registró una señal similar durante la primavera tardía. La presencia de un tipo específico de vocalización sugiere la importancia de ciertas áreas como zonas de alimentación o reproducción (Barlow et al., 2023). Por lo tanto, una alta presencia de la señal Ds refuerza la idea de que el área de la Reserva Marina Isla Chañaral es una zona de alimentación para la población de la ballena fin (Buchan et al., 2021; Pérez-Álvarez et al., 2006; Toro et al., 2016).

La presencia de vocalizaciones asociadas a la alimentación, como los Dcalls de la ballena azul y los Ds de la ballena fin, indican que esta es una zona de alimentación clave para ambas especies, dadas sus características únicas asociadas a la corriente de Humboldt y la circulación y batimetría local (Buchan et al., 2024). Si bien existen registro de alimentación para ambas

ballenas en la zona (Buchan et al., 2021; Pérez-Álvarez et al., 2006; Toro et al., 2016) el registro continuo de estas vocalizaciones apoya que el área es utilizada como una zona de alimentación recurrente. Además, la presencia constante de vocalizaciones durante todo el año sugiere una cierta permanencia de estas especies en el archipiélago, reforzando otros estudios en la zona (Sepúlveda et al., 2018). El Archipiélago de Humboldt es una zona de alta importancia para la conservación. En 2023, se declaró el Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos denominada "Archipiélago De Humboldt" (AMCP-MU) (Decreto 31, Ministerio de Medio Ambiente 2023). Los resultados encontrados en este trabajo refuerzan los esfuerzos de conservación en el área.

2. El ruido antropogénico en aguas adyacentes a la Isla Chañaral, en el Archipiélago de Humboldt

Nuestros resultados muestran una presencia antropogénica constante en el área de la Reserva Isla Chañaral, especialmente alta durante el verano y menor en el invierno. La presencia de sonidos de origen antropogénico en el área de estudio se puede asociar a varios factores, entre ellos la extracción de recursos y actividades turísticas. La Isla Chañaral pertenece a la Reserva Nacional Pingüino de Humboldt y está bajo la administración de la Corporación Nacional Forestal (CONAF). Aunque CONAF no tiene un control sobre las horas de ingreso de cada embarcación con turistas al área, sí cuenta con una estimación de la cantidad de visitantes (ver anexo 3). La variación de turistas en el área concuerda con el aumento de la presencia acústica de sonidos con origen antropogénico, esto podría ser un indicativo del registro acústico de las embarcaciones de turismo, especialmente durante los meses de verano y el comienzo del otoño. En el área de la reserva para el año 2017 existían 33 embarcaciones autorizadas para realizar paseos náuticos de observación (Sepúlveda et al. 2017) y para el año 2020 esta cantidad corresponde a 36 (Sernapesca), con un aumento de 9% en tres años se podría indicar que con el paso del tiempo la presencia acústica podría aumentar considerablemente durante las fechas estivales en el área de la Isla Chañaral.

Por otro lado, los registros acústicos durante el resto del año se podrían asociar principalmente a actividades relacionadas con la extracción de recursos, como la explotación del huiro palo, el loco o pesca artesanal (Sernapesca). En el área de la Caleta Chañaral de Aceituno existen 3 áreas

de manejo y explotación recursos bentónicos (AMERB) (Sernapesca). Adicionalmente, el turismo podría contribuir en menor manera en meses no estivales, y su presencia sería dada a la presencia de operadores turísticos que salen de forma privada y que podrían ingresar al área de la reserva durante el resto del año y que se ve reflejado en la cantidad de visitantes durante los meses del invierno.

Se identifica un patrón diario de presencia antropogénica en la zona de estudio, con mayor actividad entre las 7 am y las 6 pm (mañana y tarde), asociada principalmente a actividades económicas locales como el turismo y la extracción de recursos. Durante la noche y la madrugada, la presencia es mínima, posiblemente debido al tránsito esporádico de embarcaciones o actividades puntuales.

Este estudio valida el uso del hidrófono para identificar embarcaciones, ya que coincide con los registros de actividades locales. Se observa una marcada temporalidad durante el verano debido a los operadores turísticos locales, con una presencia diurna constante de embarcaciones utilizadas tanto para turismo como para la extracción de recursos.

Sin embargo, el análisis presenta limitaciones significativas. La gran extensión temporal dificulta la identificación manual exhaustiva, sugiriendo la necesidad de un detector automatizado para filtrar las grabaciones. Aunque esta herramienta no está validada específicamente para este propósito, se implementaron correcciones para evitar clasificaciones erróneas. Además, la falta de validación visual limita la capacidad de determinar la cantidad exacta de embarcaciones presentes en los registros acústicos y la identificación de otras fuentes potenciales de ruido antropogénico. Por otro lado, sin el rango de detección del hidrófono, lo cual es generalmente muy difícil hacer para señales de banda ancha como las embarcaciones, no podemos saber si las señales registradas son cercanas al lugar de la grabación o si son lejanas.

Los beneficios del hidrófono incluyen su naturaleza no intrusiva y su capacidad para monitorear actividades antrópicas sin perturbar las operaciones locales. Esto facilita la evaluación de la efectividad de las medidas de conservación implementadas en la zona.

3. La dinámica del sonido ambiente natural y antropogénico en aguas adyacentes a la Isla Chañaral, Archipiélago de Humboldt.

Los resultados sobre la dinámica del sonido ambiente identifican una diferencia entre las estimaciones naturales y antropogénicas, siendo estas últimas con los más altos registros. A su vez, dentro de la dinámica natural existe una diferencia para las estaciones siendo más alto en invierno que el verano. Existe una variabilidad para el análisis del sonido ambiental natural en la Isla Chañaral. Para el sonido ambiental natural se presenta una media entre 107 a 108 dB y para el antropogénico entre 108 a 110 dB para verano e invierno y 141 dB para el nivel máximo registrado. Existiendo diferencias significativas tanto para el sonido ambiente natural como el antropogénico. Estudios similares estimado una diferencia de sonido ambiental entre áreas prístinas (naturales) y urbanizadas (o con presencia antropogénica recurrente), con una diferencia entre 20 y 30 dB entre ellas (Marley et al. 2017, Haver et al. 2019). Al comparar el sonido ambiente de la Isla Chañaral con lo mencionado anteriormente, se pueden encontrar algunas similitudes, como la diferencia entre zonas prístinas, que correspondería a nuestro periodo natural, y zonas antropizadas, sin embargo, esto es aplicable a la peor condición de ruido antropogénico, el máximo nivel registrado para así decirlo, que no es la normalidad de los registros.

En cuanto el registro ambiental antropogénico con el máximo nivel registrado, el valor es casi 30 dB más alto que en el ambiente natural. A bajas frecuencias, la mayor contribución al sonido ambiente proviene de las actividades antrópicas, como embarcaciones, trabajos portuarios y prospecciones sísmicas (Estabrook et al., 2016). Aunque la actividad antropogénica en la zona de la reserva marina está limitada al turismo y extracción de recursos y pesca artesanal, no se puede ignorar el posible impacto sonoro que podría surgir del aumento de la carga turística o de la presencia de otro tipo de embarcación.

Una de las falencias del análisis es que, debido al largo período de grabación, la inclusión de todo el archivo con presencia antropogénica para calcular la media del SPL puede ser afectada por intervalos sin presencia de embarcaciones (Ver Anexo 1), lo que desplazaría la media a valores más bajos. Por otro lado, al seleccionar aleatoriamente los archivos con ruido

antropogénico puede dejar los valores más altos fuera del análisis lo que también podría influir en los resultados y subestimar el sonido ambiente antropogénico.

La ubicación del hidrófono también es un factor crucial en las mediciones. Este se encuentra al noreste de la Isla Chañaral, aproximadamente en el centro del canal (Fig. 34a). Sin embargo, dado que las ballenas y las rutas de las embarcaciones están principalmente al sur de la reserva (Fig. 34b), es posible que, aunque aumente la cantidad de embarcaciones en verano, estas no pasen cerca del hidrófono y no sean captadas en su totalidad. Por otro lado, el máximo nivel registrado podría ocurrir cuando las embarcaciones pasan más cerca del hidrófono, reflejando así una variabilidad en la detección acústica dependiendo de la proximidad de las embarcaciones al dispositivo.

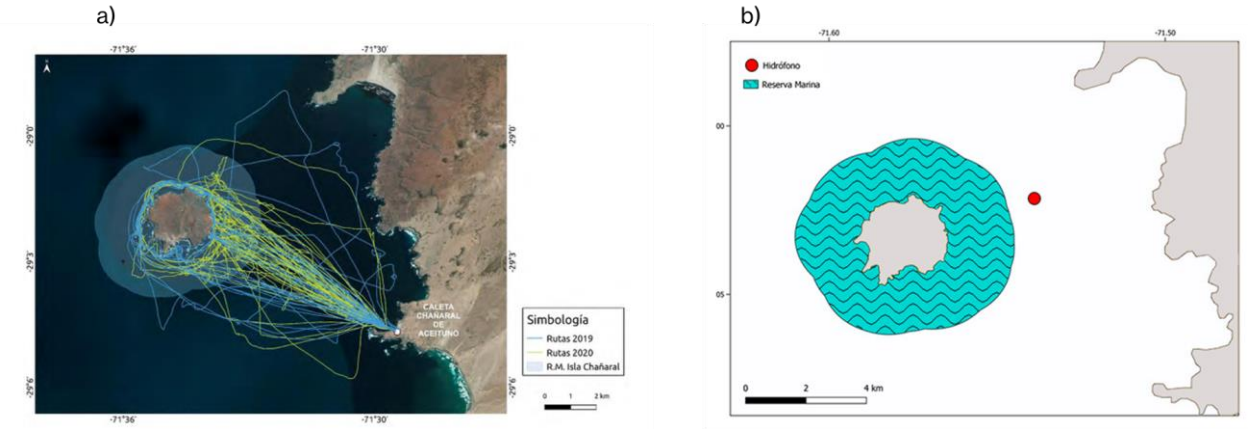


Figura 34. a) rutas de navegación de embarcaciones de turismo a la reserva marina Isla Chañaral extraída de (Sepúlveda et al., 2020) y b) ubicación del hidrófono anclado

4. El ruido antropogénico y su impacto en el espacio de comunicación de las ballenas en aguas adyacentes a la Reserva Marina Isla Chañaral, Archipiélago de Humboldt

Se ha descrito la diferencia en la propagación de las vocalizaciones según la finalidad de la emisión, el contexto o el mensaje que se transmite. Los cantos tipo SEP2 de la ballena azul y 20 Hz de la ballena fin, se han asociado a comportamientos reproductivos. En este trabajo, ambas vocalizaciones presentan un amplio CS. Ambas señales muestran un aumento en el CS en verano. Sin embargo, Sin embargo, durante el invierno (la única temporada registrada), hay una disminución del 28%, lo que podría indicar un impacto negativo sobre esta vocalización.

Por otro lado, ambas vocalizaciones se ven reducidas en un 99% bajo el máximo impacto antropogénico. Otros estudios que han realizado cálculos de reducción de CS han estimado una reducción de espacio de comunicación para grandes embarcaciones, con pérdidas entre 10 al 70 % de perdida de CS para ballena fin y franca (Cholewiak et al., 2018; Clark et al., 2009; Hatch et al., 2012). Si esta pérdida es producida por embarcaciones menores la presencia de embarcaciones mayores como buques y cruceros podrían magnificar el impacto disminuyendo aún más este espacio y los efectos pueden ser mucho peores. Puesto que este análisis se ha establecido con niveles ambientales (NL) relativamente bajos en comparación de zonas como mega puertos con niveles ambientales mayores (Burella et al., 2019).

Sobre las señales Dcall de la ballena azul y Ds de la ballena fin, estas se consideran vocalizaciones de contacto, tienen una propagación local y son asociadas a sociales como la alimentación (Lewis et al., 2018; Oleson et al., 2007). Ambas señales se reducen bajo la presencia de ruido antropogénico y desaparecen en el máximo nivel registrado de impacto.

Identificamos dos tipos de vocalizaciones de ballenas: una de gran propagación asociada a la reproducción y otra local/de contacto relacionada con comportamientos sociales y de alimentación. El mayor impacto se observa en las vocalizaciones locales, donde preocupantemente, el CS desaparece bajo el máximo impacto antropogénico. Este impacto es perjudicial para las especies, provocando aumento en la desorientación, pérdida de hábitat y cambios de comportamiento.

Sin embargo, existen otros factores naturales que puedan aportar el sonido ambiente en baja frecuencia y también afecten el espacio de comunicación, como lo son las lluvias, marejadas y sismos (Hildebrand, 2009).

Al contrario de lo que esperábamos en verano el CS de las vocalizaciones de gran propagación, como la SEP2 de la ballena azul y 20 Hz de la ballena fin, fueron más amplios bajo condiciones naturales que antropogénica en verano puede tener una respuesta metodológica. El ruido antropogénico dominante, y el estudiado, corresponde a embarcaciones menores con motor fuera de borda. Estos generan un ruido antropogénico que se presenta sobre la banda de los 40 Hz por lo que la banda de los 20 Hz donde se encuentran estas vocalizaciones "escapa" del impacto lo que significa que en cálculo de CS éste no se vea impactado (Anexo 5). Entonces el efecto directo de la influencia de este tipo de embarcación en particular afecta más a las vocalizaciones sociales que se encuentran en estas bandas de frecuencia (Anexo 6). Por otro lado, no consideramos que las ballenas podrían aumentar las vocalizaciones en presencia de embarcaciones (Castellote et al., 2012; Melcón et al., 2012) como forma de evitar el efecto que este pueda producir, el llamado efecto Lombard,

Otros posibles impactos que puede ocasionar la presencia de las embarcaciones tenemos efectos fisiológicos aumentando el estrés crónico (Rolland et al., 2012), cambios en el forrajeo (Blair et al., 2016), pérdida de audición temporal y desorientación (Mooney et al., 2009). Otro efecto de la presencia del ruido antropogénico se evidencia en los niveles de estrés de los cetáceos en presencia del ruido antropogénico aumentando los niveles de hormonas (Lemos et al., 2022; Rolland et al., 2012). Por lo que es sumamente importante el efecto de las embarcaciones en los cetáceos no únicamente en el ámbito de la comunicación.

En el área de estudio, se ha documentado un cambio en el comportamiento de las ballenas en respuesta a la velocidad y la proximidad de las embarcaciones en comportamientos como buceo y alejamiento ante la perturbación (Santos-Carvallo et al., 2021). Sin embargo, el ruido producido por las embarcaciones no se analizó previamente.

Por otro lado, el ruido antropogénico no solo afecta a las ballenas, sino que también tiene un impacto en sus presas. Aunque las ballenas podrían tolerar el efecto, especies de peces pequeños

sufren significativamente (Bart et al., 2001; Weilgart, 2007), y sin presas, las ballenas no permanecerían en la zona.

Finalmente, los resultados de este estudio permiten aceptar la hipótesis planteada, postulando que el aumento del ruido antropogénico, originado por embarcaciones menores, reduce el espacio de comunicación de las ballenas.

5. Aporte de este estudio para la conservación de las especies y el manejo de la nueva área marina costera protegida archipiélago de Humboldt (AMCP-MU)

Los resultados de este estudio muestran el efecto del ruido producido por las embarcaciones menores en el espacio de comunicación de las ballenas. Los registros de sonido ambiente natural sin la presencia de embarcaciones (que fue el 77% del tiempo), se encuentra en concordancia con otras áreas protegidas, media de ~107-115 dB (Buscaino et al., 2016; Sánchez-Gendriz & Padovese, 2016). Por otro lado, el sonido ambiente antropogénico tiene una diferencia hasta 3 dB para las temporadas estudiadas y hasta 30 dB para el máximo nivel registrado en este estudio similar a lo registrado por Sánchez-Gendriz & Padovese, (2016). Para las temporadas esta diferencia puede pensarse que no es tan grave, pero esto significa una pérdida de espacio de comunicación entre el 10 al 50 % en la medición estándar y entre un 99 a 100% en el máximo nivel registrado, siendo esto un escenario preocupante para las ballenas en esta área.

Si este impacto es producido solo por las embarcaciones menores el impacto puede ser mucho peor con otro tipo de embarcaciones donde por ejemplo un buque o un crucero podrían aportar además más de 10 dB (McKenna et al., 2012) al sonido ambiente impactando al nivel del máximo nivel registrado estimado. Por lo que la presencia continua grandes embarcaciones, principalmente en los meses con presencia de las ballenas, reduciría el espacio de comunicación de las ballenas a un nivel similar al estimado para un máximo nivel con una pérdida del 100%, por lo que se recomienda que está área esté libre de sonido de grandes embarcaciones.

Por otro lado, información resulta clave para la toma de decisiones con respecto al área protegida, en primera instancia se debe llegar a un acuerdo de los estándares mínimos para que

las actividades antropogénicas, especialmente de economía local, no afecten en mayor medida a las ballenas. Dentro de las opciones que se pueden realizar se podría limitar el horario de ingreso de embarcaciones menores al área cercana a la Isla Chañaral para tener “espacios de silencio” que garantice los comportamientos naturales de las especies en el área durante la mayor parte del día. Así mismo, otros estudios muestran que poner un límite de la velocidad reduce el ruido producido por las embarcaciones (Haver et al., 2023; R. Williams et al., 2019), esto se puede replicar en el área delimitando rutas de navegación o estableciendo límites de velocidad de navegación para minimizar el impacto. Pero para ello se debe realizar estimaciones de impacto para distintas velocidades de navegación.

6. Fortalezas y limitaciones de este estudio

En relación con los aspectos positivos identificados en este estudio. Se destaca una caracterización detallada de los sonidos biológicos, antropogénicos y ambientales de baja frecuencia en una zona crítica para las ballenas azules y fin. Esto por la implementación de un análisis manual de los registros que minimiza errores como falsos positivos o falsos negativos, permitiendo un análisis confiable y preciso.

Además, la extensa duración de la grabación facilita la identificación de la presencia y tipos de vocalización sin depender de observadores visuales, proporcionando información valiosa para la conservación de las especies y la determinación de áreas críticas.

Desde el punto de vista metodológico, este estudio es pionero en estimar el impacto del ruido producido por las embarcaciones menores en la zona de la Isla Chañaral, mostrando la factibilidad del uso de acústica pasiva y usando un enfoque novedoso para la evaluación comparativa del impacto del ruido antropogénico, utilizando diferentes escenarios de ruido para simular condiciones naturales y de máximo impacto. Además, este estudio también introduce un enfoque comparativo para evaluar el impacto del ruido antropogénico en el espacio de comunicación de las ballenas, considerando diferentes escenarios de ruido siendo un aporte para los planes de manejo de la AMCP-MU y que puede ser replicado en otras zonas de interés.

En términos de aplicación práctica, los resultados de este estudio proporcionan recomendaciones clave para la gestión y conservación en el archipiélago de Humboldt, en espacian en las aguas adyacentes a la Isla Chañaral. Las evidencias obtenidas sugieren la necesidad de implementar medidas para mitigar el impacto del tráfico de embarcaciones, especialmente durante los periodos de mayor actividad turística, información necesaria de incluir en el diseño de manejo de la actividad y estrategias de conservación para la especie.

Además, los datos y análisis generados en este estudio ofrecen una base sólida para futuras investigaciones sobre el impacto del ruido antropogénico en otros ecosistemas marinos. Los métodos y resultados presentados aquí pueden servir como referencia para la evaluación de problemas similares en otras reservas marinas y zonas críticas para la biodiversidad.

A pesar de los importantes resultados obtenidos, este estudio presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas. En primer lugar, aunque el período de estudio de 13 meses es relativamente amplio, el equipo estuvo fuera del agua durante 3 meses, lo que impide el análisis de datos de primavera limitando la variabilidad temporal considerada.

En la zona de estudio no tenemos la validación visual de los registros acústicos, por lo que la asociación vocalización-conducta sigue siendo en base a lo encontrado en la literatura. Asimismo, la existencia de un único hidrófono limita el área cubierta en el análisis, excluyendo las partes más oceánicas o más al sur de la AMCP-MU, lo que nos limita a un espacio geográfico que no abarca toda la extensión del área protegida. Por otro lado, la diferencia en el tiempo de grabación entre los periodos, de 10 y 20 minutos, podría influir en la captura de vocalizaciones y embarcaciones fuera de estos intervalos lo que podría subestimar estos resultados.

También es importante mencionar que podrían existir posibles fuentes de ruido que puedan afectar la calidad de la grabación y del análisis posterior, como ruido mecánico o electrónico. También la presencia de condiciones externas, cómo marejadas, lluvias u otros sonidos biológicos o antropogénicos de baja frecuencia, que podrían solaparse con las vocalizaciones de las ballenas afectando su identificación y registro. Además, el rango de detección del hidrófono es desconocido, lo que impide conocer la ubicación de las ballenas que emiten las vocalizaciones analizadas y esto también aplica a la ubicación de las embarcaciones. Tampoco conocemos la

velocidad de las embarcaciones registradas y que solo podemos identificar el efecto de la presencia de las embarcaciones.

7. Trabajo científico a futuro

Por otro lado, si bien este estudio ha proporcionado aportes valiosos, aún existen varias áreas que requieren una investigación adicional para profundizar en la comprensión del impacto del ruido antropogénico en la comunicación de las ballenas. En primer lugar, sería beneficioso ampliar el alcance temporal del análisis para identificar los patrones acústicos anuales y estacionales de las ballenas en el Archipiélago de Humboldt. Este enfoque permitiría una mejor comprensión de sus dinámicas a lo largo del año.

La incorporación de tecnologías avanzadas, como detectores automáticos o inteligencia artificial, podría hacer que el análisis sea más eficiente y preciso. Esto en primera instancia para reducir el tiempo del análisis de las grabaciones y en segunda instancia la creación de un monitoreo en tiempo real de, por ejemplo, embarcaciones puede ayudar al control de ingreso al área protegida ya sea para la extracción de recursos de forma ilegal o en el caso del turismo de controlar la capacidad de carga de la zona manteniendo niveles de sonido ambiental establecidos.

La implementación de múltiples hidrófonos distribuidos a lo largo de todo el Archipiélago de Humboldt proporcionaría una cobertura más amplia y detallada. Esto no solo mejoraría la resolución de la información, sino que también permitiría una mejor comprensión de las dinámicas biológicas y antropogénicas en la región. Una red de hidrófonos más extensa podría revelar factores adicionales que podrían perturbar a las ballenas azules y fin, impactando en su comunicación como en su presencia en la zona. Esto como la utilización de explosivos para pesca ilegal, la presencia de embarcaciones no reguladas, el exceso de embarcaciones de turismo que saturen el ambiente marino y que afecten tanto a las ballenas como a otras especies de cetáceos en la zona.

Aunque este trabajo ha evaluado el impacto del ruido de las embarcaciones menores, es esencial ampliar el espectro de estudio para incluir otras variables. Por ejemplo, se debería modelar el efecto del ruido de grandes embarcaciones o buques, así como el impacto de diferentes tipos de embarcaciones simultáneamente para determinar si existe un efecto acumulativo al número de embarcaciones. Además, sería útil analizar el impacto del ruido a distintas distancias de las ballenas para evaluar la distancia máxima de acercamiento. También se podría examinar el efecto del ruido a diferentes velocidades de acercamiento, afinando así los modelos de estimación de espacios de comunicación. También se podría replicar estas mediciones con otras tecnologías adicionales al hidrófono anclado, como lo es la utilización de marcaje de seguimiento (CATS, TAGS) que incluya hidrófono donde los mismos animales grabaran el ambiente sonoro marino, estimando el impacto acústico antropogénico en el animal directamente. Todo esto contribuiría a mejorar las recomendaciones en los manuales de buenas prácticas de turismo en la zona, y podría aplicarse a otras áreas con presencia de ballenas donde existan actividades antropogénicas.

Adicionalmente, este impacto se puede medir en otras formas. Estudios bioquímicos han demostrado que el ruido antropogénico aumenta los niveles de cortisol en otras especies (Lemos et al., 2022; Rolland et al., 2012), por lo que medir esta hormona en presencia antropogénica y sin ella podría dar más información sobre este impacto y ser una medición adicional de modo de control del estrés de las ballenas en el área protegida.

V. CONCLUSIONES

Los registros acústicos muestran que existe una presencia temporal, marcada en verano, de la ballena azul y una presencia casi anual para la ballena fin.

Hay una constante presencia antropogénica en el área de estudio (33% de la data), siendo mayor en verano y en horas diurnas asociadas a actividades económicas locales como lo son el turismo de avistamiento y la extracción de recursos.

El sonido ambiental natural es variable y menor que en el antropogénico para todas las estaciones estudiadas, similar a otras áreas marinas protegidas.

El espacio de comunicación es amplio, >100 km^2 para las señales asociadas a reproducción como lo son las vocalizaciones SEP2 de la ballena azul y 20 Hz de la ballena fin.

El espacio de comunicación es más acotado y local, <10 km^2, para las señales asociadas a comportamiento como alimentación, como lo son las vocalizaciones tipo Dcall de la ballena azul y Downsweep (Ds) de la ballena fin.

Existe una reducción del espacio de comunicación entre un 10 y 50% para las vocalizaciones asociadas a alimentación, tipo Dcall de la ballena azul y Downsweep (Ds) de la ballena fin, para verano e invierno en presencia de ruido antropogénico.

Existe una reducción del espacio de comunicación entre un 20 y 40% para las vocalizaciones asociadas a reproducción, SEP2 de la ballena azul y 20 Hz de la ballena fin, para el invierno en presencia de ruido antropogénico.

Se recomienda optimizar el diseño de levantamiento de información acústica con la finalidad de mantener un monitoreo complementario en el tiempo que permita identificar el efecto del impacto antropogénico considerando, por ejemplo, distintas distancias de acercamiento, velocidad de acercamiento y distintos números de embarcaciones presentes a la vez, y consecuentemente permita proponer medidas de mitigación asociadas para reducir el impacto antropogénico sin afectar la economía local.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Abramson, J., & Gibbons, J. (2010). New records of blue whales Balaenoptera musculus (Linnaeus, 1758) in winter season in the inlet waters of Chiloé continental-Chile. Anales Instituto Patagonia, 38(2).

Acevedo, J., O'Grady, M., & Wallis, B. (2012). Sighting of the fin whale in the Eastern Subtropical South Pacific: Potential breeding ground? Revista de Biología Marina y Oceanografía, 74(3).

Acoustics: Determination of Occupational Noise Exposure and Estimation of Noise-induced Hearing Impairment. ISO-1999 (1990).

Aguilar De Soto, N., Madsen, P. T., Tyack, P., Arranz, P., Marrero, J., Fais, A., Revelli, E., & Johnson, M. (2012). No shallow talk: Cryptic strategy in the vocal communication of Blainville's beaked whales. Marine Mammal Science, 28(2). https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2011.00495.x

Aguilar Soto, N., Johnson, M., Madsen, P. T., Tyack, P. L., Bocconcelli, A., & Fabrizio Borsani, J. (2006). Does intense ship noise distrupt foraging in deep-diving Cuvier´s Beaked Whales (Ziphius cavirostris)? Marine Mammal Science, 22(3). https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2006.00044.x

Ainslie, M. A. (2009). Propagation of underwater sound. En M. Ainslie, Principles of Sonar Performance Modelling (pp. 439-512). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-87662-5_9

Akamatsu, T., Wang, D., Nakamura, K., & Wang, K. (1998). Echolocation range of captive and free-ranging baiji (Lipotes vexillifer), finless porpoise (Neophocaena phocaenoides), and

bottlenose dolphin (Tursiops truncatus). The Journal of the Acoustical Society of America, 104(4), Article 4. https://doi.org/10.1121/1.423757

Alarcón, C. (2023). Análisis de la profundidad de vocalización de la ballena fin (Balaenoptera physalus) en su zona de alimentación alrededor de la Reserva Marina Isla Chañaral, basado en Marcas Acústicas [Seminario de Titulo]. Universidad de Concepción.

Alosilla, G. (2019). Determinación de la presencia de grandes cetáceos en la Reserva Marina Isla Chañaral, zona norte de Chile, utilizando herramientas visuales y acústicas: Una comparación de ambos métodos [Tesis de pregrado]. Universidad de Valparaíso.

André, M., Delory, E., Degollada, E., Alonso, J., Del Rio, J., Van Der Schaar, M., Castell, J. V., & Morell, M. (2007). Identifying cetacean hearing impairment at Stranding Sites. Aquatic Mammals, 33(1), 100-109. https://doi.org/10.1578/am.33.1.2007.100

Arranz, P., DeRuiter, S. L., Stimpert, A. K., Neves, S., Friedlaender, A. S., Goldbogen, J. A., Visser, F., Calambokidis, J., Southall, B. L., & Tyack, P. L. (2016). Discrimination of fast click series produced by tagged Risso's dolphins (Grampus griseus) for echolocation or communication. Journal of Experimental Biology, jeb.144295. https://doi.org/10.1242/jeb.144295

Au, W. W. L., & Hastings, M. C. (2008). Principles of Marine Bioacoustics. Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78365-9

Au, W. W. L., & Lammers, M. O. (2014). Cetacean Acoustics. En T. D. Rossing (Ed.), Springer Handbook of Acoustics (pp. 843-875). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0755-7_20

Azevedo, A. F., Flach, L., Bisi, T. L., Andrade, L. G., Dorneles, P. R., & Lailson-Brito, J. (2010). Whistles emitted by Atlantic spotted dolphins (Stenella frontalis) in southeastern Brazil.

The Journal of the Acoustical Society of America, 127(4). https://doi.org/10.1121/1.3308469

Barlow, D. R., Klinck, H., Ponirakis, D., Holt Colberg, M., & Torres, L. G. (2023). Temporal occurrence of three blue whale populations in New Zealand waters from passive acoustic monitoring. Journal of Mammalogy, 104(1). https://doi.org/10.1093/jmammal/gyac106

Bart, A. N., Clark, J., Young, J., & Zohar, Y. (2001). Underwater ambient noise measurements in aquaculture systems: A survey. Aquacultural Engineering, 25(2), 99-110. https://doi.org/10.1016/S0144-8609(01)00074-7

Bass, A. H., & Clark, C. W. (2003). The physical acoustics of underwater sound communication. En A. M. Simmons, R. R. Fay, & A. N. Popper (Eds.), Acoustic Communication (Vol. 16, pp. 15-64). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/0-387-22762-8_2

Berchok, C. L., Bradley, D. L., & Gabrielson, T. B. (2006). St. Lawrence blue whale vocalizations revisited: Characterization of calls detected from 1998 to 2001. The Journal of the Acoustical Society of America, 120(4), 2340-2354. https://doi.org/10.1121/1.2335676

Bioacoustics Research Program. (2012). Raven pro 1.6 Bioacoustics Research Program (1.6) [Software].

Blair, H. B., Merchant, N. D., Friedlaender, A. S., Wiley, D. N., & Parks, S. E. (2016). Evidence for ship noise impacts on humpback whale foraging behaviour. Biology Letters, 12(8), 20160005. https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0005

Brandt, M., Diederichs, A., Betke, K., & Nehls, G. (2011). Responses of harbour porpoises to pile driving at the Horns Rev II offshore wind farm in the Danish North Sea. Marine Ecology Progress Series, 421, 205-216. https://doi.org/10.3354/meps08888

Buchan, S., Vásquez, P., Olavarría, C., & Castro, L. R. (2021a). Prey items of baleen whale species off the coast of Chile from fecal plume analysis. Marine Mammal Science, 37(3), 1116-1127. https://doi.org/10.1111/mms.12782

Buchan, S., Pérez-Santos, I., Narváez, D., Castro, L., Stafford, K., Baumgartner, M., Valle-Levinson, A., Montero, P., Gutiérrez, L., Daneri, G., & Neira, S. (2021b). Intraseasonal variation in southeast Pacific blue whale acoustic presence, zooplankton backscatter, and oceanographic variables on a feeding ground in Northern Chilean Patagonia. Progress in Oceanography, 199(102709). https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102709.

Buchan, S., Ramos, M., Oyanadel, J., Santos-Carvallo, M., Bedriñana-Romano, L., Valladares, M., Maldonado, M., Astudillo, O., Sepúlveda, M., Pearce, S., & Olavarría, C. (2024). Understanding the oceanographic dynamics of the Isla Chañaral baleen whale feeding ground, (Humboldt Archipelago, Northern Chile) to extend habitat protection. Frontiers in Marine Science, 10, 1208262. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1208262

Buchan, S., Stafford, K., & Hucke-Gaete, R. (2014). Seasonal occurrence of southeast Pacific blue whale songs in southern chile and the eastern tropical Pacific. Marine Mammal Science, 31(2). https://doi.org/10.1111/mms.12173

Burella, G., Moro, L., & Colbourne, B. (2019). Noise sources and hazardous noise levels on fishing vessels: The case of Newfoundland and Labrador's fleet. Ocean Engineering, 173, 116-130. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.062

Burnham, R. E., Vagle, S., O'Neill, C., & Trounce, K. (2021). The efficacy of management measures to reduce vessel noise in critical habitat of Southern resident Killer Whales in the Salish Sea. Frontiers in Marine Science, 8. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.664691

Buscaino, G., Ceraulo, M., Pieretti, N., Corrias, V., Farina, A., Filiciotto, F., Maccarrone, V., Grammauta, R., Caruso, F., Giuseppe, A., & Mazzola, S. (2016). Temporal patterns in the soundscape of the shallow waters of a Mediterranean marine protected area. Scientific Reports, 6(1). https://doi.org/10.1038/srep34230

Cárcamo, F. (2024). Los ciclos de movilización contra la violencia extractivista en el archipiélago de Humboldt. Ecología Política, 67, 102-107.

Castellote, M., Clark, C. W., & Lammers, M. O. (2012). Acoustic and behavioural changes by fin whales (Balaenoptera physalus) in response to shipping and airgun noise. Biological Conservation, 147(1), 115-122. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.12.021

CEAZA. Centro de Estudios avanzados en Zonas Áridas. https://ceaza.cl/

Cholewiak, D., Clark, C., Ponirakis, D., Frankel, A., Hatch, L., Risch, D., Stanistreet, J., Thompson, M., Vu, E., & Van Parijs, S. (2018). Communicating amidst the noise: Modeling the aggregate influence of ambient and vessel noise on baleen whale communication space in a national marine sanctuary. Endangered Species Research, 36, 59-75. https://doi.org/10.3354/esr00875

Clark, C., Ellison, W., Southall, B., Hatch, L., Van Parijs, S., Frankel, A., & Ponirakis, D. (2009). Acoustic masking in marine ecosystems: Intuitions, analysis, and implication. Marine Ecology Progress Series, 395, 201-222. https://doi.org/10.3354/meps08402

Cobley, P. (2008). Communication: Definitions and Concepts. En W. Donsbach (Ed.), The International Encyclopedia of Communication (1.a ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781405186407.wbiecc071

Collins, M. D. (1993). A split-step Padé solution for the parabolic equation method. The Journal of the Acoustical Society of America, 93(4), 1736-1742. https://doi.org/10.1121/1.406739

CONAF. (2009). Plan de manejo de la Reserva Nacional Pingûino de Humboldt. Corporación Nacional Forestal (CONAF).

Cox, T. M., Ragen, T. J., Read, A. J., Vos, E., Baird, R. W., Balcomb, K., Barlow, J., Caldwell, J., Cranford, T., Crum, L., D'Amico, A., D'Spain, G., Fernandez, A., Finneran, J., Gentry, R., Gerth, W., Gulland, F., Hildebrand, J., Houser, D., Benner, L. (2005). Understanding the impacts of anthropogenic sound on beaked whales. J. Cetacean Res. Manage., 7(3), 177-187. https://doi.org/10.47536/jcrm.v7i3.729

Croll, D., Clark, C., Acevedo, A., Tershy, B., Flores, S., Gedamke, J., & Urban, J. (2002). Only male fin whales sing loud songs. Nature, 417(809). https://doi.org/10.1038/417809a

Cruz, E., Lloyd, T., Lafeber, F. H., Bosschers, J., Vaz, G., & Djavidnia, S. (2022). The SOUNDS project: Towards effective mitigation of underwater noise from shipping in Europe. 070021. https://doi.org/10.1121/2.0001638

De Jong, K., Forland, T. N., Amorim, M. C. P., Rieucau, G., Slabbekoorn, H., & Sivle, L. D. (2020). Predicting the effects of anthropogenic noise on fish reproduction. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 30(2), 245-268. https://doi.org/10.1007/s11160-020-09598-9

Decreto 31 declara Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos denominada «Archipiélago de Humboldt» (2023).

Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., Erbe, C., Gordon, T. A. C., Halpern, B. S., Harding, H. R., Havlik, M. N., Meekan, M., Merchant, N. D., Miksis-Olds, J. L., Parsons, M., Predragovic, M., Radford, A. N., Radford, C. A., Simpson, S. D., Juanes, F. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. Science, 371(6529). https://doi.org/10.1126/science.aba4658

Dudzinski, K. M., Gregg, J. D., Paulos, R. D., & Kuczaj, S. A. (2010). A comparison of pectoral fin contact behaviour for three distinct dolphin populations. Behavioural Processes, 84(2). https://doi.org/10.1016/j.beproc.2010.02.013

Dudzinski, K. M., & Hill, H. M. (2018). Cetacean Communication. En J. Vonk & T. Shackelford (Eds.), Encyclopedia of Animal Cognition and Behavior (pp. 1-12). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47829-6_992-1

Dudzinski, K. M., Thomas, J. A., & Gregg, J. D. (2009). Communication in marine mammals. En Encyclopedia of Marine Mammals (pp. 260-269). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373553-9.00064-X

Dunlop, R. A., Cato, D. H., & Noad, M. J. (2008). Non-song acoustic communication in migrating humpback whales (Megaptera novaeangliae). Marine Mammal Science, 24(3). https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2008.00208.x

ECHO, P. (2023). Enhancing Cetacean Habitat and Observation (ECHO) Program. Port of Vancouver. https://www.portvancouver.com/environmental-protection-at-the-port-of-vancouver/maintaining-healthy-ecosystems-throughout-our-jurisdiction/echo-program/

Edds-Walton, P. L. (1997). Acoustic communication signals of mysticete whales. Bioacoustics, 8(1-2), 47-60. https://doi.org/10.1080/09524622.1997.9753353

Environment Protection and Biodiversity Conservation Act 1999 (1999).

Erbe, C., Marley, S. A., Schoeman, R. P., Smith, J. N., Trigg, L. E., & Embling, C. B. (2019). The effects of ship noise on marine mammals—A Review. Frontiers in Marine Science, 6, 606. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00606

Erbe, C., & Thomas, J. A. (Eds.). (2022). Exploring animal behavior through sound: volume 1: Methods. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97540-1

Estabrook, B., Ponirakis, D., Clark, C., & Rice, A. (2016). Widespread spatial and temporal extent of anthropogenic noise across the northeastern Gulf of Mexico shelf ecosystem. Endangered Species Research, 30, 267-282. https://doi.org/10.3354/esr00743

Finneran, J. J., Schlundt, C. E., Carder, D. A., Clark, J. A., Young, J. A., Gaspin, J. B., & Ridgway, S. H. (2000). Auditory and behavioral responses of bottlenose dolphins (Tursiops truncatus) and a beluga whale (Delphinapterus leucas) to impulsive sounds resembling distant signatures of underwater explosions. The Journal of the Acoustical Society of America, 108(1), 417-431. https://doi.org/10.1121/1.429475

Försterra, G., & Häussermann, V. (2012). Report on blue whales sightings (Balaenoptera musculus Linnaeus, 1758) in a narrow fjord during autumn-winter in southern Chile. Spixiana, 35(2).

Gedamke, J., Harrison, J., Hatch, L., Angliss, R., Barlow, J., Berchok, C., Caldow, C., Castellote, M., Cholewiak, D., DeAngelis, M., Dziak, R. P., Garlan, E., Guan, S., Hastings, S., Holt, M., Laws, B., Mellinger, D. K., Moore, S. E., Oleson, E., Wahle, C. (2016). Ocean noise strategy roadmap. NOAA.

Gibbons, J. (1992). Estudio sobre conducta y dinámica grupal del tursión en la Isla Chañaral. III región, Chile [Tesis de pregrado]. Universidad de Chile.

Gordon, C. (2018). Anthropogenic noise and cetacean interactions in the 21st Century: A contemporary Review of the Impacts of Environmental Noise Pollution on Cetacean Ecologies [Portland State University]. https://doi.org/10.15760/honors.636

Harrison, J., Ferguson, M., Gedamke, J., Hatch, L., Southall, B., & Van Parijs, S. (2016). National oceanic and atmospheric administration's cetacean and sound mapping effort: continuing forward with an integrated ocean noise strategy. En A. N. Popper & A.

Hawkins (Eds.), The Effects of Noise on Aquatic Life II (Vol. 875, pp. 409-416). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2981-8_48

Hatch, L. T., Clark, C. W., Van Parijs, S. M., Frankel, A. S., & Ponirakis, D. W. (2012). Quantifying loss of acoustic communication space for right whales in and around a U.S. National Marine Sanctuary. Conservation Biology, 26(6), 983-994. https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01908.x

Haver, S. M., Haxel, J., Dziak, R. P., Roche, L., Matsumoto, H., Hvidsten, C., & Torres, L. G. (2023). The variable influence of anthropogenic noise on summer season coastal underwater soundscapes near a port and marine reserve. Marine Pollution Bulletin, 194, 115406. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115406

Hildebrand, J. (2004). Impacts of anthropogenic sound on cetaceans. Unpublished paper submitted to the International Whaling Commission Scientific Committee SC/56 E, 13.

Hildebrand, J. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. Marine Ecology Progress Series, 395, 5-20. https://doi.org/10.3354/meps08353

Hucke-Gaete, R., Bedriñana-Romano, L., Viddi, F., Ruiz, J., Torres-Florez, J. P., & Zerbini, A. (2018). From Chilean Patagonia to Galapagos Ecuador: Novel insights on blue whale migratory pathways along the Eastern South Pacific. PeerJ, 6(e4695). https://doi.org/10.7717/peerj.4695

Janik, V. M. (2014). Cetacean vocal learning and communication. Current Opinion in Neurobiology, 28, 60-65. https://doi.org/10.1016/j.conb.2014.06.010

Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., & Schmidt, H. (2011). Computational Ocean Acoustics. Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8678-8

Jensen, F., Bejder, L., Wahlberg, M., Aguilar De Soto, N., Johnson, M., & Madsen, P. (2009). Vessel noise effects on delphinid communication. Marine Ecology Progress Series, 395, 161-175. https://doi.org/10.3354/meps08204

Johnston, S. T., & Painter, K. J. (2024). Avoidance, confusion or solitude? Modelling how noise pollution affects whale migration. Movement Ecology, 12(1), 17. https://doi.org/10.1186/s40462-024-00458-w

Kastelein, R. A., Helder-Hoek, L., Cornelisse, S. A., Defillet, L. N., Huijser, L. A. E., & Gransier, R. (2021). Temporary hearing threshold shift in a harbor porpoise (Phocoena phocoena) due to exposure to a continuous One-Sixth-Octave Noise Band Centered at 0.5 kHz. Aquatic Mammals, 47(2), Article 2. https://doi.org/10.1578/AM.47.2.2021.135

Krause, B. (2008). Anatomy of the Soundscape: Evolving Perspectives. journal of the audio engineering society, 56, 73-80.

Lemos, L. S., Haxel, J. H., Olsen, A., Burnett, J. D., Smith, A., Chandler, T. E., Nieukirk, S. L., Larson, S. E., Hunt, K. E., & Torres, L. G. (2022). Effects of vessel traffic and ocean noise on gray whale stress hormones. Scientific Reports, 12(1), 18580. https://doi.org/10.1038/s41598-022-14510-5

Lewis, L., Calambokidis, J., Stimpert, A., Fahlbusch, J., Friedlaender, A., McKenna, M., Mesnick, S., Oleson, E., Southall, B., Szesciorka, A., & Širović, A. (2018). Contex-dependent variability in blue whale acoustic behaviour. Royal Society Open Science, 5(180241), Article 180241. https://doi.org/10.1098/rsos.180241

Luna-Jorquera, G., Fernández, C. E., & Rivadeneira, M. M. (2012). Determinants of the diversity of plants, birds and mammals of coastal islands of the Humboldt current

systems: Implications for conservation. Biodiversity and Conservation, 21(1), 13-32. https://doi.org/10.1007/s10531-011-0157-2

Luttenberger, L. R., & Gudeji, I. (2024). Impact and control of environmental noise (First edition). Jenny Stanford Publishing. https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003475163-2/impact-control-environmental-noise-lidija-runko-luttenberger-ivana-gudelj

Madsen, P. T. (2005). Marine mammals and noise: Problems with root mean square sound pressure levels for transients. The Journal of the Acoustical Society of America, 117(6), 3952-3957. https://doi.org/10.1121/1.1921508

Madsen, P. T., Siebert, U., & Elemans, C. P. H. (2023). Toothed whales use distinct vocal registers for echolocation and communication. Science, 379(6635). https://doi.org/10.1126/science.adc9570

Mathworks. (2022). MATLAB, version 9.12 (R2022a) [Software]. The MathWorks Inc.

McDonald, M., Hildebrand, J., & Webb, S. (1995). Blue and fin whales observed on a seafloor array in the Northeast Pacific. The Journal of the Acoustical Society of America, 98(2). https://doi.org/10.1121/1.413565

McKenna, M. F., Ross, D., Wiggins, S. M., & Hildebrand, J. A. (2012). Underwater radiated noise from modern commercial ships. The Journal of the Acoustical Society of America, 131(1), 92-103. https://doi.org/10.1121/1.3664100

Melcón, M. L., Cummins, A. J., Kerosky, S. M., Roche, L. K., Wiggins, S. M., & Hildebrand, J. A. (2012). Blue Whales Respond to Anthropogenic Noise. PLoS ONE, 7(2), e32681. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032681

Merchant, N., Putland, R. L., André, M., Baudin, E., Felli, M., Slabbekoorn, H., & Dekeling, R. (2022). A decade of underwater noise research in support of the European Marine Strategy Framework Directive. Ocean & Coastal Management, 228, 106299. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106299

Merchant, N., Fristrup, K., Johnsin, M., Tyack, peter, witt, M., Blondel, P., & Parks, S. (2015). Measuing acoustic habitats. Methods in Ecology and Evolution, 6(3). https://doi.org/10.1111/2041-210x.12330

Miller, B. S., Calderan, S., Leaper, R., Miller, E. J., Širović, A., Stafford, K. M., Bell, E., & Double, M. C. (2021). Source level of antarctic blue and fin whale sounds recorded on sonobuoys deployed in the deep-ocean off antarctica. Frontiers in Marine Science, 8, 792651. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.792651

Miller, P., Biassoni, N., Samuels, A., & Tyack, P. L. (2000). Whale songs lengthen in response to sonar. Nature, 405(6789), 903-903. https://doi.org/10.1038/35016148

Miller, P., Isojunno, S., Siegal, E., Lam, F.-P. A., Kvadsheim, P. H., & Curé, C. (2022). Behavioral responses to predatory sounds predict sensitivity of cetaceans to anthropogenic noise within a soundscape of fear. Proceedings of the National Academy of Sciences, 119(13), e2114932119. https://doi.org/10.1073/pnas.2114932119

Miller, P., Kvadsheim, P. H., Lam, F. P. A., Tyack, P. L., Curé, C., DeRuiter, S. L., Kleivane, L., Sivle, L. D., Van IJsselmuide, S. P., Visser, F., Wensveen, P. J., Von Benda-Beckmann, A. M., Martín López, L. M., Narazaki, T., & Hooker, S. K. (2015). First indications that northern bottlenose whales are sensitive to behavioural disturbance from anthropogenic noise. Royal Society Open Science, 2(6), 140484. https://doi.org/10.1098/rsos.140484

Ministerio de Medio Ambiente. (2020). Ministerio del Medio Ambiente crea Comité Operativo para el Control del Ruido Submarino. https://mma.gob.cl/ministerio-del-medio-ambiente-crea-comite-operativo-para-el-control-del-ruido-submarino/

Medio Ambiente. 2023. Declara Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos denominada "Archipiélago de Humboldt". Decreto Número 31. Santiago, 1 de septiembre de 2023. Disponible en https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1198446

Mobley, J. R., & Helweg, D. A. (1990). Visual ecology and cognition in cetaceans. En J. A. Thomas & R. A. Kastelein (Eds.), Sensory Abilities of Cetaceans (pp. 519-536). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0858-2_36

Montgomery, J. C., & Radford, C. A. (2017). Marine bioacoustics. Current Biology, 27(11), R502-R507. https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.01.041

Mooney, T. A., Nachtigall, P. E., & Vlachos, S. (2009). Sonar-induced temporary hearing loss in dolphins. Biology Letters, 5(4), Article 4. https://doi.org/10.1098/rsbl.2009.0099

Morano, J. L., Salisbury, D. P., Rice, A. N., Conklin, K. L., Falk, K. L., & Clark, C. W. (2012). Seasonal and geographical patterns of fin whale song in the western North Atlantic Ocean. The Journal of the Acoustical Society of America, 132(2), 1207-1212. https://doi.org/10.1121/1.4730890

Morell, M., IJsseldijk, L. L., Berends, A. J., Gröne, A., Siebert, U., Raverty, S. A., Shadwick, R. E., & Kik, M. J. L. (2021). Evidence of hearing loss and unrelated toxoplasmosis in a free-ranging Harbour Porpoise (Phocoena phocoena). Animals, 11(11), 3058. https://doi.org/10.3390/ani11113058

Moreno, K. R., & Macgregor, R. P. (2019). Bubble trails, bursts, rings, and more: a review of multiple bubble types produced by cetaceans. Animal Behavior and Cognition, 6(2), Article 2. https://doi.org/10.26451/abc.06.02.03.2019

Morisaka, T. (2012). Evolution of communication sounds in odontocetes: A Review. International Journal of Comparative Psychology, 25(1), Article 1. https://doi.org/10.46867/IJCP.2012.25.01.04

Oleson, E., Calambokidis, J., Burgess, W., McDonald, M., LeDuc, C., & Hildebrand, J. (2007). Behavioral context of call production by eastern North Pacific blue whales. Marine Ecology Progress Series, 330, 269-284.

Parks, S. E., Cusano, D. A., Stimpert, A. K., Weinrich, M. T., Friedlaender, A. S., & Wiley, D. N. (2014). Evidence for acoustic communication among bottom foraging humpback whales. Scientific Reports, 4(1), Article 1. https://doi.org/10.1038/srep07508

Parsons, E., Wright, A., & Gore, M. (2008). The nature of humpback whale (Megaptera novaeangliae) Song. Journal of Marine Animals and Their Ecology, 1(1), Article 1.

Pearson, E. J., Oestreich, W. K., Ryan, J. P., Haver, S. M., Gedamke, J., Dziak, R. P., & Wall, C. C. (2023). Widespread passive acoustic monitoring reveals spatio-temporal patterns of blue and fin whale song vocalizations in the Northeast Pacific Ocean. Frontiers in Remote Sensing, 4, 994518. https://doi.org/10.3389/frsen.2023.994518

Pérez-Álvarez, M. J., Thomas, F., Uribe, F., Sepúlveda, M., Flores, M., & Moraga, R. (2006). Fin Whales (Balaenoptera physalus) feeding on euphausia mucronata in nearshore waters off North-Central Chile. Aquatic Mammals, 32(1). https://doi.org/10.1578/AM.32.1.2006.109

Pérez-Alvarez, M. J., Vásquez, R. A., Moraga, R., Santos-Carvallo, M., Kraft, S., Sabaj, V., Capella, J., Gibbons, J., Vilina, Y., & Poulin, E. (2018). Home sweet home: Social dynamics and genetic variation of a long-term resident bottlenose dolphin population off the Chilean coast. Animal Behaviour, 139, 81-89. https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2018.03.009

Pijanowski, B. C., Farina, A., Gage, S. H., Dumyahn, S. L., & Krause, B. L. (2011). What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. Landscape Ecology, 26(9), 1213-1232. https://doi.org/10.1007/s10980-011-9600-8

Popper, A. N., Fewtrell, J., Smith, M. E., & McCauley, R. D. (2003). Anthropogenic sound: effects on the behavior and physiology of fishes. Marine Technology Society Journal, 37(4), 35-40. https://doi.org/10.4031/002533203787537050

Pryor, K. W. (1990). Non-Acoustic Communication in Small Cetaceans: Glance, Touch, Position, Gesture, and Bubbles. En J. A. Thomas & R. A. Kastelein (Eds.), Sensory Abilities of Cetaceans (pp. 537-544). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0858-2_37

R Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing [Software]. R foundation for statistical computing. r foundation for statistical computing

Radford, A. N., Kerridge, E., & Simpson, S. D. (2014). Acoustic communication in a noisy world: Can fish compete with anthropogenic noise? Behavioral Ecology, 25(5), 1022-1030. https://doi.org/10.1093/beheco/aru029

Redaelli, L., Mangia Woods, S., Landea, R., & Sayigh, L. (2022). Seasonal trends and diel patterns of downsweep and sep calls in chilean blue whales. Journal of Marine Science and Egineering, 10(316). https://doi.org/10.3390/jmse10030316

Rolland, R. M., Parks, S. E., Hunt, K. E., Castellote, M., Corkeron, P. J., Nowacek, D. P., Wasser, S. K., & Kraus, S. D. (2012). Evidence that ship noise increases stress in right whales. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 279(1737), 2363-2368. https://doi.org/10.1098/rspb.2011.2429

Ross, D. (2005). Ship sources of ambient noise. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 30(2), 257-261. https://doi.org/10.1109/JOE.2005.850879

RStudio Team. (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio [Software]. http://www.rstudio.com/.

Samaran, F., Guinet, C., Adam, O., Motsch, J.-F., & Cansi, Y. (2010). Source level estimation of two blue whale subspecies in southwestern Indian Ocean. The Journal of the Acoustical Society of America, 127(6), 3800-3808. https://doi.org/10.1121/1.3409479

Sánchez-Gendriz, I., & Padovese, L. R. (2016). Underwater soundscape of marine protected areas in the south Brazilian coast. Marine Pollution Bulletin, 105(1), 65-72. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.02.055

Santos-Carvallo, M., Barilari, F., Pérez-Alvarez, M. J., Gutiérrez, L., Pavez, G., Araya, H., Anguita, C., Cerda, C., & Sepúlveda, M. (2021). Impacts of whale-watching on the short-term behavior of fin whales (Balaenoptera physalus) in a marine protected area in the Southeastern Pacific. Frontiers in Marine Science, 8, 623954. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.623954

Santos-Carvallo, M., Sepúlveda, M., Moraga, R., Landaeta, M. F., Oliva, D., & Pérez-Alvarez, M. J. (2018). Presence, behavior, and resighting pattern of transient bottlenose dolphins (Tursiops truncatus) in the Humboldt Current System off North-Central Chile. Pacific Science, 72(1), 41-56. https://doi.org/10.2984/72.1.3

Schall, E., Di Iorio, L., Berchok, C., Filún, D., Bedriñana-Romano, L., Buchan, S., Van Opzeeland, I., Sears, R., & Hucke-Gaete, R. (2019). Visual and passive acoustic observations of blue whale trios from two distinct populations. Marine Mammal Science, 36(1), 365-374. https://doi.org/10.1111/mms.12643

Schall, E., Thomisch, K., Boebel, O., Gerlach, G., Mangia Woods, S., T. Roca, I., & Van Opzeeland, I. (2021). Humpback whale song recordings suggest common feeding ground occupation by multiple populations. Scientific Reports, 11(1), Article 1. https://doi.org/10.1038/s41598-021-98295-z

Schlundt, C. E., Finneran, J. J., Carder, D. A., & Ridgway, S. H. (2000). Temporary shift in masked hearing thresholds of bottlenose dolphins, Tursiops truncatus, and white whales, Delphinapterus leucas, after exposure to intense tones. The Journal of the Acoustical Society of America, 107(6), 3496-3508. https://doi.org/10.1121/1.429420

Scott-Phillips, T. C. (2008). Defining biological communication. Journal of Evolutionary Biology, 21(2), Article 2. https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2007.01497.x

SEIA. (2022). Criterio de evaluación en el SEIA: predicción y evaluación de impactos por ruido submarino. Servicio de Evaluación Ambiental. https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2022/08/31/dt_ruido_submarino.pdf

Sepúlveda, M., Oliva, D., Pavez, G., & Santos-Carvallo, M. (2016). Caleta Chañaral de Aceituno: Destino turístico de alta calidad para el avistamiento de cetáceos, otros mamíferos y aves marinas.

Sepúlveda, M., Pavez, G., & Santos-Carvallo, M. (2017). Whale-watching en la Reserva Marina Isla Chañaral: Manejo y planificación para una actividad sustentable.

Sepúlveda, M., Pérez-Álvarez, M. J., Santos-Carvallo, M., Pavez, G., Olavarría, Carlos., Moraga, R., & Zerbini, A. (2018). From whaling to whale watching: identifying fin whale critical foraging habitats off the chilean coast. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 28(4). https://doi.org/10.1002/aqc.2899

Sepúlveda, M., Santos-Carvallo, M., Pavez, G., Pérez-Álvarez, M. J., Olavarria, C., Fernández, C., Hernández, C., Ardiles, A., Hernández, P., Barilari, F., López, D., Flores, M., & Luna, G. (2020). Determinación del estado poblacional en las Reservas Marinas isla Chañaral e islas Choros y Damas, de las especies delfín nariz de botella, chungungo, pingüino de Humboldt y cetáceos. Informe Final Proyecto FIPA 2018-43 (p. 343) [Informe Final].

Simard, P., Lace, N., Gowans, S., Quintana-Rizzo, E., Kuczaj, S. A., Wells, R. S., & Mann, D. A. (2011). Low frequency narrow-band calls in bottlenose dolphins (Tursiops truncatus): Signal properties, function, and conservation implications. The Journal of the Acoustical Society of America, 130(5). https://doi.org/10.1121/1.3641442

Simonis, A. E., Forney, K. A., Rankin, S., Ryan, J., Zhang, Y., DeVogelaere, A., Joseph, J., Margolina, T., Krumpel, A., & Baumann-Pickering, S. (2020). Seal bomb noise as a potential threat to Monterey Bay Harbor Porpoise. Frontiers in Marine Science, 7, 142. https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00142

Širović, A., Hildebrand, J. A., & Wiggins, S. M. (2007). Blue and fin whale call source levels and propagation range in the Southern Ocean. The Journal of the Acoustical Society of America, 122(2), 1208-1215. https://doi.org/10.1121/1.2749452

Širović, A., Hildebrand, J. A., Wiggins, S. M., McDonald, M. A., Moore, S. E., & Thiele, D. (2004). Seasonality of blue and fin whale calls and the influence of sea ice in the Western

Antarctic Peninsula. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 51(17-19), 2327-2344. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.08.005

Širović, A., Williams, L., Kerosky, S., Wiggins, S., & Hildebrand, J. (2013). Temporal separation of two fin whale call types across the eastern North Pacific. Marine Biology, 160, 47-57.

Sørensen, P. M., Haddock, A., Guarino, E., Jaakkola, K., McMullen, C., Jensen, F. H., Tyack, P. L., & King, S. L. (2023). Anthropogenic noise impairs cooperation in bottlenose dolphins. Current Biology, 33(4). https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.12.063

Thiele, M., Castilla, J., Fernández, M., & Navarrete, S. (2007). The Humboldt current system of northern and central Chile, oceanographic processes, ecological interactions and socioeconomic feedback.

Toro, F., Vilina, Y., Capella, J., & Gibbons, J. (2016). Novel Coastal feeding area for eastern South Pacific fin whales (Balaenoptera physalus) in mid-latitude Humboldt Current Waters off Chile. Aquatic Mammals, 42(1). https://doi.org/10.157/AM.42.1.2016.47

Torres-Florez, J. P., Olson, P., Bedriñana-Romano, L., Rosen-Baum, H., Ruiz, J., LeDuc, R., & Hucke-Gaete, R. (2015). First documented migratory destination for eastern South Pacific blue whales. Marine Mammal Science, 31(4). https://doi.org/10.1111/mms.12239

Tougaard, J., Wright, A. J., & Madsen, P. T. (2015). Cetacean noise criteria revisited in the light of proposed exposure limits for harbour porpoises. Marine Pollution Bulletin, 90(1-2), 196-208. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.10.051

Tyack, P. L. (2000). Functional Aspects of Cetacean Communication. En Cetacean societies: Field studies of dolphins and whales (p. 270).

Tyack, P. L. (2008). Implications for marine mammals of large-scale changes in the marine acoustic environment. Journal of Mammalogy, 89(3), 549-558. https://doi.org/10.1644/07-MAMM-S-307R.1

Urick, R. J. (1975). Principles of underwater sound (Rev. ed.). McGraw-Hill.

Vega, M., Buchan, S., Olavarria, C., Ramos, M., & Valladares, M. (2023). Preliminary characterization and diel variation of fin whale (Balaenoptera physalus) downsweep calls off Isla Chañaral, northern Chile. Marine Mammal Science, mms.13038. https://doi.org/10.1111/mms.13038

Wang, D., Huang, W., Garcia, H., & Ratilal, P. (2016). Vocalization source level distributions and pulse compression gains of diverse baleen whale species in the Gulf of Maine. Remote Sensing, 8(11), 1-20. https://doi.org/10.3390/rs8110881

Watkins, W. (1981). Activities and underwater sounds of fin whales. The Scientific Reports of the Whales Research Institute, 33, 83-117.

Watkins, W. A., Tyack, P., Moore, K. E., & Bird, J. E. (1987). The 20-Hz signals of finback whales (Balaenoptera physalus). The Journal of the Acoustical Society of America, 82(6), 1901-1912. https://doi.org/10.1121/1.395685

Weilgart, L. S. (2007). The impacts of anthropogenic ocean noise on cetaceans and implications for management. Canadian Journal of Zoology, 85(11), Article 11. https://doi.org/10.1139/Z07-101

Weirathmueller, M. J., Stafford, K. M., Wilcock, W. S. D., Hilmo, R. S., Dziak, R. P., & Tréhu, A. M. (2017). Spatial and temporal trends in fin whale vocalizations recorded in the NE Pacific Ocean between 2003-2013. PLOS ONE, 12(10), e0186127. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186127

Wiggins, S. M., Oleson, E. M., McDonald, M. A., & Hildebrand, J. A. (2005). Blue whale (Balaenoptera musculus) diel call patterns offshore of Southern California. Aquatic Mammals, 31(2), 161-168. https://doi.org/10.1578/AM.31.2.2005.161

Williams, R., Clark, C. W., Ponirakis, D., & Ashe, E. (2014). Acoustic quality of critical habitats for three threatened whale populations: Acoustic quality of critical whale habitats. Animal Conservation, 17(2), 174-185. https://doi.org/10.1111/acv.12076

Williams, R., Veirs, S., Veirs, V., Ashe, E., & Mastick, N. (2019). Approaches to reduce noise from ships operating in important killer whale habitats. Marine Pollution Bulletin, 139, 459-469. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.015

Williams, R., Wright, A. J., Ashe, E., Blight, L. K., Bruintjes, R., Canessa, R., Clark, C. W., Cullis-Suzuki, S., Dakin, D. T., Erbe, C., Hammond, P. S., Merchant, N. D., O'Hara, P. D., Purser, J., Radford, A. N., Simpson, S. D., Thomas, L., & Wale, M. A. (2015). Impacts of anthropogenic noise on marine life: Publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management. Ocean & Coastal Management, 115, 17-24. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.05.021

Williams, T. M., Blackwell, S. B., Tervo, O., Garde, E., Sinding, M. S., Richter, B., & Heide-Jørgensen, M. P. (2022). Physiological responses of narwhals to anthropogenic noise: A case study with seismic airguns and vessel traffic in the Arctic. Functional Ecology, 36(9), 2251-2266. https://doi.org/10.1111/1365-2435.14119

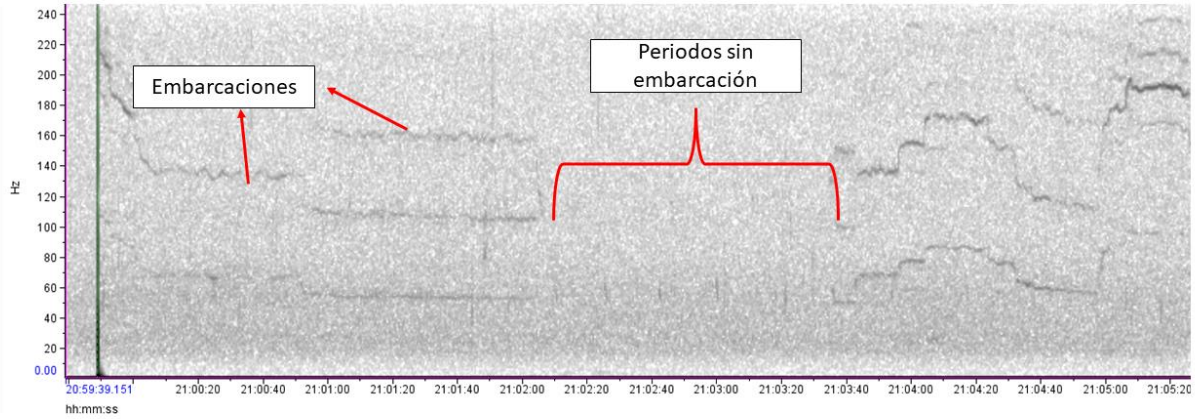
Würsig, B., Kieckhefer, T. R., & Jefferson, T. A. (1990). Visual displays for communication in cetaceans. En J. A. Thomas & R. A. Kastelein (Eds.), Sensory Abilities of Cetaceans (pp. 545-559). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0858-2_38

Yori, A. (2023). Field study on underwater noise emitted by small tourist boats. Comparison between the use of electric and combustion motors. Archives of Acoustics. https://doi.org/10.24425/aoa.2023.145239

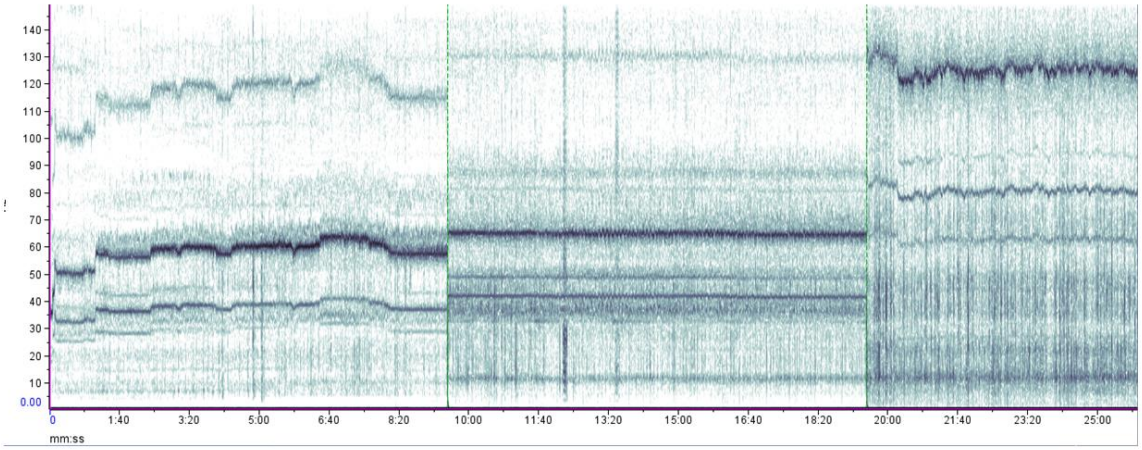
Yori, A. (2018). Underwater Assessment of Anthropogenic Noise Sources Using a Field Recording Method. Acta Acustica United With Acustica, 104(1), 13–24. https://doi.org/10.3813/aaa.919141

VII. ANEXOS

Anexo 1. Espectrograma de la presencia de huella acústica de embarcaciones con periodos sin embarcación en la zona de la Reserva Marina Isla Chañaral. Para esta figura el eje Y corresponde a la frecuencia (Hz) de la grabación y el eje X corresponde al tiempo (hh: mm: ss) de la grabación. Raven Pro 1.6 ventana 4096 FFT, 50% overlap, Hann window.



Anexo 2. Espectrograma de la de huella acústica de embarcaciones, editado con periodos solo con presencia de embarcaciones en la zona de la Reserva Marina Isla Chañaral. Para esta figura el eje Y corresponde a la frecuencia (Hz) de la grabación y el eje X corresponde al tiempo (hh: mm: ss) de la grabación. Raven Pro 1.6 ventana 4096 FFT, 50% overlap, Hann window.



Anexo 3. Cantidad de visitantes a la Reserva Marina Isla Chañaral, registro interno de CONAF Atacama.

2017	
mes	N° visitantes
Ene	2931
Feb	5100
Mar	1037
Abr	751
May	66
Jun	12
Jul	52
Ago	99
Sep	316
Oct	123
Nov	174
Dic	876
total	11537

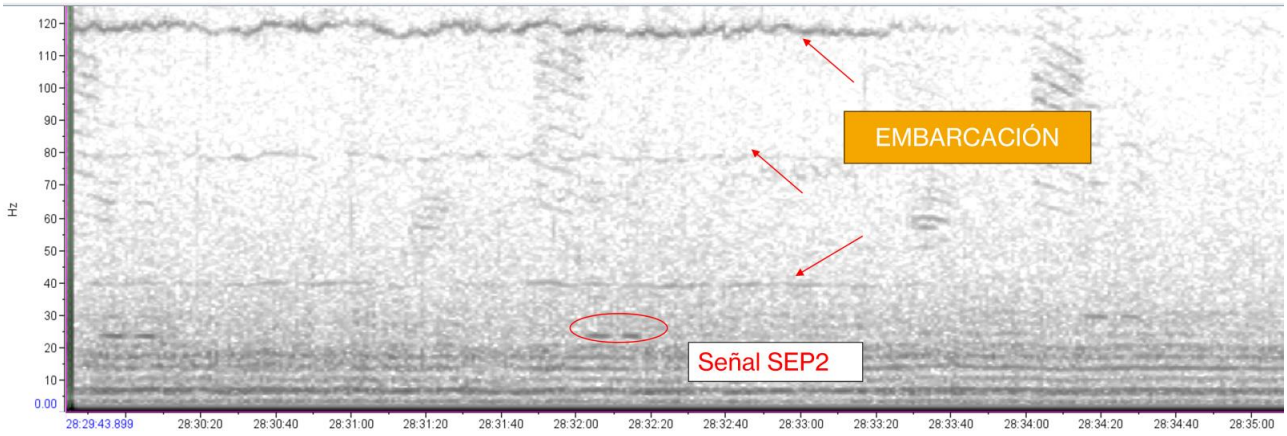
2018	
mes	N° visitantes
Ene	2778
Feb	5392
Mar	705
Abr	206
May	116
Jun	0
Jul	55
Ago	7
Sep	228
Oct	104
Nov	874
Dic	1347
total	11812

2019	
mes	N° visitantes
Ene	3283
Feb	4080
Mar	416
Abr	247
May	34
Jun	5
Jul	109
Ago	0
Sep	188
Oct	73
Nov	504
Dic	1834
total	10773

Anexo 4 Calculo TLm y en función de SL, SNR y NL (NL obtenido en nos niveles de banda 1/3 octava.

	Vocalización	TLm	=	SL	-	SNR	-	NL
verano natural	20Hz	86,26	=	189	-	10	-	92,74
otoño natural	20Hz	82,11	=	189	-	10	-	96,89
invierno natural	20Hz	84,43	=	189	-	10	-	94,57
verano antropogénico	20Hz	86,71	=	189	-	10	-	92,29
invierno antropogénico	20Hz	81,54	=	189	-	10	-	97,46
max. Niv. Registado	20Hz	62,18	=	189	-	10	-	116,82
verano natural	Ds	68,11	=	173,5	-	10	-	95,39
otoño natural	Ds	68,18	=	173,5	-	10	-	95,32
invierno natural	Ds	67,82	=	173,5	-	10	-	95,68
verano antropogénico	Ds	67,42	=	173,5	-	10	-	96,08
invierno antropogénico	Ds	65,93	=	173,5	-	10	-	97,57
max. Niv. Registado	Ds	32,98	=	173,5	-	10	-	130,52
verano natural	SEP_2	71,26	=	174	-	10	-	92,74
otoño natural	SEP_2	67,11	=	174	-	10	-	96,89
invierno natural	SEP_2	69,43	=	174	-	10	-	94,57
verano antropogénico	SEP_2	71,71	=	174	-	10	-	92,29
invierno antropogénico	SEP_2	66,54	=	174	-	10	-	97,46
max. Niv. Registado	SEP_2	47,18	=	174	-	10	-	116,82
verano natural	D_call	50,21	=	156	-	10	-	95,79
otoño natural	D_call	50,51	=	156	-	10	-	95,50
invierno natural	D_call	50,42	=	156	-	10	-	95,58
verano antropogénico	D_call	49,54	=	156	-	10	-	96,46
invierno antropogénico	D_call	47,43	=	156	-	10	-	98,57
max. Niv. Registrado	D_call	18,22	=	156	-	10	-	127,78

Anexo 5. Espectrograma de la presencia simultanea de la señal SEP2 de la ballena azul y de la huella acústica de las embarcaciones en bandas de frecuencia distinta en la zona de la Reserva Marina Isla Chañaral. Para esta figura el eje Y corresponde a la frecuencia (Hz) de la grabación y el eje X corresponde al tiempo (hh: mm: ss) de la grabación. Raven Pro 1.6 ventana 4096 FFT, 50% overlap, Hann window.



Anexo 6. Espectrograma de la presencia simultanea de la señal Ds de la ballena fin y de la huella acústica de las embarcaciones en la misma banda de frecuencia en la zona de la Reserva Marina Isla Chañaral. Para esta figura el eje Y corresponde a la frecuencia (Hz) de la grabación y el eje X corresponde al tiempo (hh: mm: ss) de la grabación. Raven Pro 1.6