

Contribución a la evaluación del impacto del ruido submarino; revisión de fuentes, propagación y recepción de energía acústica en el medio marino.



Pablo Cervantes¹, Fco. Javier Rodrigo Saura¹

¹ Sociedad Anónima de Electrónica Submarina, S., M., E. (SAES).

P.A.C.S.: 43.30.Nb

Resumen

En la actualidad, el impacto del ruido submarino en la fauna y flora marina es un área de gran interés, y en especial en la Unión Europea tras la publicación de la Directiva Marco en el 2008. El estudio del impacto generado por el ruido submarino implica el desarrollo de diferentes disciplinas incluyendo la acústica, la biología, física, procesamiento de señal, etc.

El objetivo del presente artículo es detallar conceptos necesarios para la implantación de una metodología de evaluación de impacto consistente en el análisis de riesgos a partir del modelo emisor-propagación-receptor, profundizando en cada uno de estos elementos del modelo mediante el uso de estudios publicados con el objeto de proporcionar una base de conocimiento para abordar estudios de contaminación e impacto generado por el ruido submarino.

Palabras clave: Contaminación submarina, Impacto de ruido, paisaje sonoro submarino.

Abstract

Currently, the impact of underwater noise on marine fauna and flora is an area of great interest, especially in the European Union after the publication of the Framework Directive in 2008. The study of the impact generated by underwater noise involves the development of different disciplines including acoustics, biology, physics, signal processing, etc.

The objective of this paper is to detail the necessary concepts for the implementation of an impact assessment methodology consisting of risk analysis based on the emitter-propagation-receiver model, delving into each of these elements of the model using published studies. in order to provide a knowledge base to address pollution and impact studies generated by underwater noise.

Keywords: Underwater pollution, noise impact assessment, underwater soundscape.

1 Introducción

La acústica submarina es la disciplina de la acústica que estudia la generación, propagación y medida del sonido en el medio acuático, incluyendo tanto sonidos naturales, propios del medio acuático, como los artificiales generados por la actividad y presencia del ser humano en el entorno marino. Como cualquier área de la acústica, la acústica submarina es una ciencia multidisciplinar en la que intervienen multitud de otras disciplinas tales como, física, biología, fisiología, procesamiento de señal e inteligencia artificial entre otras.

La bioacústica es una ciencia que combina biología y acústica. Ésta se encarga del estudio de la relación existente entre los seres vivos y el sonido, esto es, la generación, la transmisión y dispersión, y la recepción del sonido en seres vivos. Tradicionalmente, la investigación en estos campos se ha realizado de manera independiente entre ellos, sin embargo, la ecología acústica intenta aunar y establecer metodologías que tienen en cuenta cada una de las fases de la sonificación de un ambiente para el estudio de este.

En el presente trabajo se presentan dos metodologías para el análisis del impacto medioambiental generado por el ruido submarino, el modelo basado en el análisis del riesgo y el modelo basado en el estudio de zonas de influencia. Dichos modelos están basados en el análisis de tres objetos o componentes, emisor-propagación-receptor. Ambas metodologías, así como cada uno de los tres objetos o componentes de ambas metodologías son detallados en los siguientes apartados.

2 Metodologías para la evaluación de impacto de ruido submarino.

Una metodología muy utilizada hoy en día en diversos campos, entre ellos en el estudio del impacto del sonido sobre ecosistemas marinos, se denomina enfoque basado en el riesgo (Risk-Based Approach en inglés).

Los métodos fundamentados en la gestión del riesgo se basan en la identificación, caracterización y análisis de los riesgos, así como en su gestión y manejo incluyendo métodos de seguimiento, reducción y mitigación de estos [1].



Figura 1. Esquema sobre las fases del enfoque basado en riesgo. Extraído de la referencia [1].

De hecho, esta metodología es considerada como la base en la que debe estar soportada toda regulación y/o decisiones sobre sistemas de mitigación de ruido submarino [2].

Otra metodología relevante utilizada es la metodología basada en zonas de influencia de ruido. En la Figura 2 se muestra gráficamente esta metodología. Esta metodología se basa en la utilización de las características auditivas de diferentes especies, y las características de las fuentes sonoras para el establecimiento de diferentes distancias definidas por el tipo de alteración generada en dichas especies (desde daños físicos y fisiológicos, considerados los más severos, hasta la no alteración).

Cómo se puede observar en la Figura 1 y la Figura 2, ambas metodologías se basan en tres objetos o elementos

principales de estudio. Estos elementos son presentados en la Tabla 1.

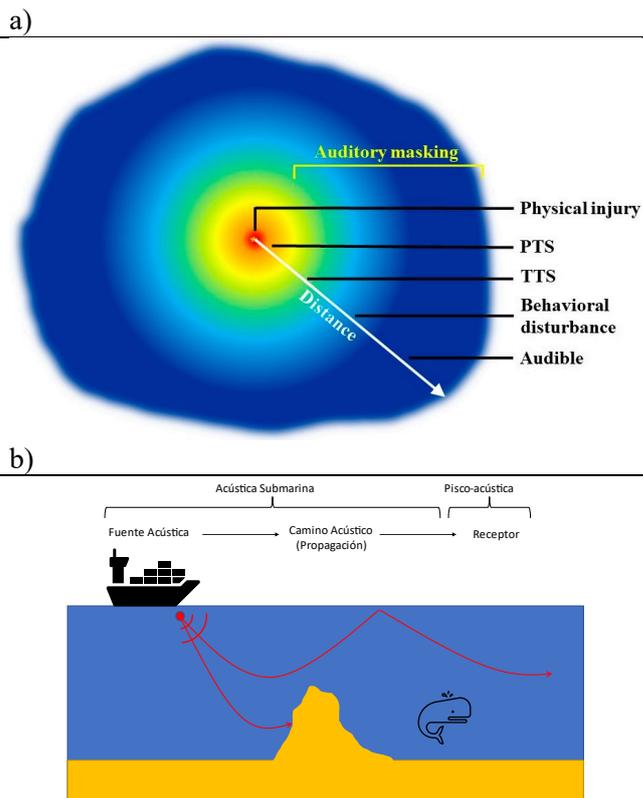


Figura 2.a) Modelo de metodología de zonas de influencia de ruido. Extraído de la referencia [3]. b) Diferentes aspectos y campos de estudio para la implantación del modelo de zonas de riesgo.

Objeto	Descripción
Fuente Acústica	Caracterización de la fuente sonora.
Camino Acústico	Estudio de la propagación del sonido.
Receptor	Estudio de la percepción y efectos del sonido sobre el hábitat (especie o ecosistema) de dicho ambiente.

Tabla 1. Objetos o elementos de estudio para la implantación de las metodologías de evaluación de impacto de ruido submarino.

Por lo tanto, es necesario tener un conocimiento de cada uno de los tres objetos o elementos para la implementación de cualquiera de las dos metodologías de impacto presentadas.

3 Fuentes Acústicas – Paisajes Sonoros

El paisaje sonoro subacuático puede definirse como la suma de todas las fuentes y características acústicas tanto naturales como artificiales en una localización específica [4].

Los sonidos en el contexto de los paisajes sonoros se pueden dividir de acuerdo con su origen en, biológicos, geológicos o antropogénicos, siendo sus fuentes principales organismos (animales), fenómenos naturales

tales como viento, lluvia o terremotos, y actividades humanas tales como transporte, exploración o explotación de recursos marinos respectivamente. En la Figura 3 se muestra gráficamente las fuentes contribuyentes al paisaje sonoro submarino.

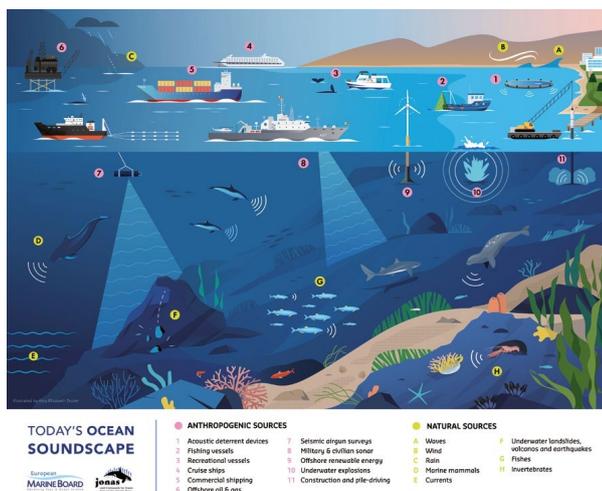


Figura 3. Esquema de diferentes fuentes sonoras de un paisaje sonoro submarino. Extraído de la referencia [5].

Así, la interacción espacial y temporal de estos tres tipos de sonidos determinan patrones que caracterizan el paisaje sonoro, siendo los sonidos biológicos los principales afectados por los otros dos tipos de sonido, geológicos y antropogénicos.

La combinación de los sonidos biológicos y sonidos geológicos se denomina comúnmente sonido o ruido ambiente. En la Figura 4 se pueden observar un ejemplo del espectrograma de un paisaje sonoro subacuático medido en el cañón de Perth (Australia).

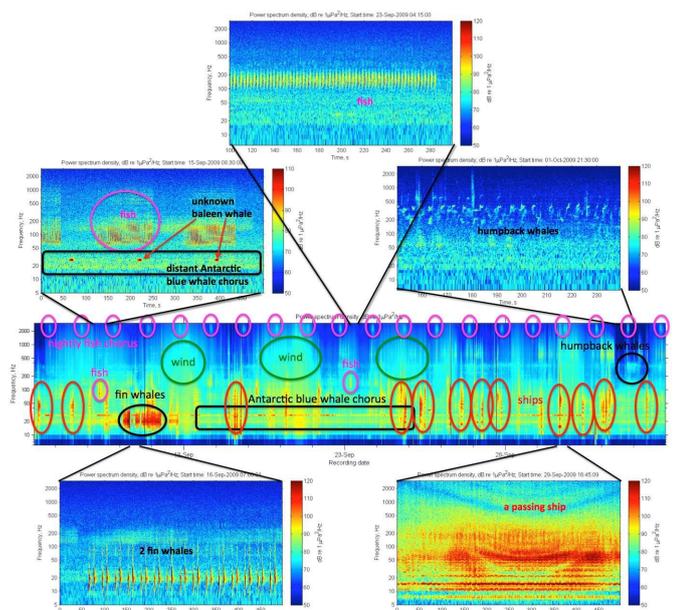


Figura 4. Ejemplo de espectrograma de un paisaje sonoro, donde se pueden identificar diferentes fuentes acústicas. Extraído de la referencia [6].

Se puede observar cómo la zona alta frecuencial es gobernada por sonido ambiente, tanto de origen

biológico (sonidos de peces periódicos nocturnos) como de origen geológico (viento). En la zona baja-media de frecuencia se observan tanto sonidos biológicos (vocalizaciones de mamíferos marinos) como sonidos antropogénicos (tráfico marítimo).

La caracterización acústica de todas estas fuentes sonoras es extremadamente importante para el correcto análisis y uso de los mapas sonoros como herramientas para los estudios de impacto de ruido submarino.

En general, las fuentes sonoras se caracterizan por: Frecuencia (Hz) de emisión, Intensidad/ Nivel de fuente (dB ref 1 µPa @ 1 m), Duración (s ó ms), Ciclo de Trabajo (%), Ancho de Banda (Hz), Directividad, Potencia de Salida (W) y Persistencia. La propagación del ruido radiado por una fuente acústica submarina depende de factores como la temperatura y la salinidad del agua de mar, ambas en función de la profundidad, profundidad y tipo de fondo, y profundidad de la fuente sonora.

3.1 Sonidos Biológicos

Los sonidos biológicos se definen como sonidos no-humanos producidos por organismos vivos en una determinada biomasa [7]. Los sonidos biológicos tienen diferentes fuentes y patrones de acuerdo con la latitud y la estación y hora del día, es decir, es espacio-temporal dependiente.

Estos sonidos son emisiones, (cantos, llamadas, alarmas, vocalizaciones) generadas por especies submarinas generalmente usadas con fines comunicativos, defensa, búsqueda de comida o apareamiento.

Los sonidos biológicos en el ambiente marino se pueden dividir generalmente en sonidos producidos por animales vertebrados e invertebrados. Entre los vertebrados más importantes en el contexto de paisajes sonoros se encuentran los mamíferos marinos y los peces. A continuación, se describe cada uno de ellos.

3.1.1 Sonidos generados por mamíferos marinos

Los mamíferos marinos han evolucionado para usar el sonido como la modalidad sensorial primaria. Los principales sonidos emitidos por los mamíferos marinos son para comunicación y para la búsqueda de comida y navegación.

De acuerdo a la referencia [8], los sonidos emitidos por mamíferos marinos se pueden dividir en tres tipos diferentes, atendiendo a sus características tiempo-frecuenciales, éstos son:

1. Onda Continua (Constant Wave, CW).
2. Modulación en Frecuencia (Frequency Modulated, FM).

3. Pulsos de Banda Ancha (Broad-Band Pulses, BBP).

El primer tipo de sonido, CW, tiene una componente tonal fundamental y característica mientras que el segundo contiene una serie de frecuencias que pueden crecer o decrecer monótonamente desde una frecuencia de inicio hasta una frecuencia final definidas. Este tipo de sonidos también se denominan sweeps, whistles o cantos. Ambos tipos pueden contener armónicos.

El tercer tipo de sonido emitido por mamíferos son sonidos impulsivos con un espectro de banda ancha.

No todos los mamíferos marinos utilizan todos los tipos de sonidos, y es por ello, por lo que se puede hacer una división de los tipos de sonidos dependiendo del orden o suborden de mamífero marino.

Así, por ejemplo, los misticetos (ballena franca, rorcual, ballena gris, etc.), hacen uso de los tres tipos diferentes de sonidos.

Los odontocetos (cachalote, orca común, delfín mular, marsopa, etc.) también hacen uso de los tres tipos de sonidos. En el caso de los pulsos de banda ancha, cabe destacar que este grupo utiliza un tipo de señal con una frecuencia determinada o modulada muy corta ($< 1\text{ms}$) llamado “burst” o también denominado “Clicks”. Estos “burst” se pueden presentar de forma muy continua (serie denominada trenes de bursts) en la que el tiempo entre cada “burst” es denominado Inter-Click-Interval (ICI),

Los pinnípedos (elefante marino, león marino, morsa, etc.) emiten sonidos tanto en el ambiente marino como en el terrestre. La mayoría de los sonidos emitidos por estos mamíferos son clasificados como pulsos y al igual que los odontocetos, estos pulsos pueden contener señales moduladas en amplitud o en frecuencia.

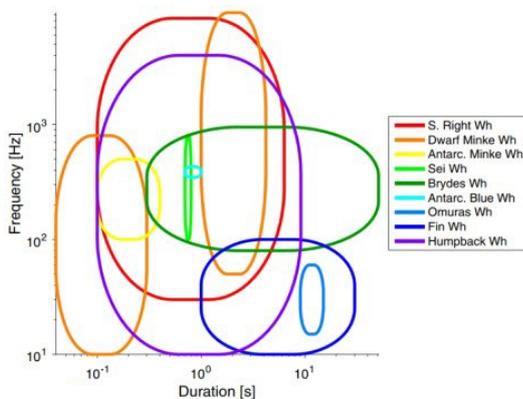


Figura 5. Ejemplo de frecuencias fundamentales y duración de vocalizaciones de tipo pulsado típicas de misticetos, odontocetos y pinnípedos. Extraído de la referencia [8].

En la Figura 6 se muestra el ejemplo de un típico sonido tipo whistle con una serie de frecuencias fundamentales y sus armónicos.

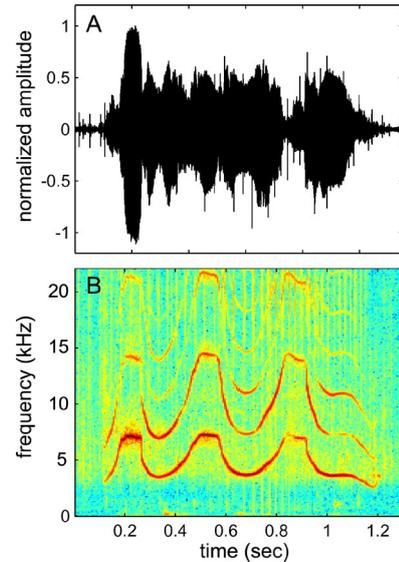


Figura 6. Forma de onda y espectrograma correspondiente al whistle generado por un delfín de nariz de botella. Extraído de la referencia [9].

Dentro de los sonidos biológicos que se pueden encontrar en un mapa sonoro, el sonido producido por los mamíferos marinos es el más ampliamente estudiado en todos los ámbitos, motivo, mecanismos de generación, detección, clasificación, etc.

Debido a la complejidad intrínseca que conlleva la detección de este tipo de sonidos en grabaciones de larga duración de forma visual (mediante espectrogramas) o de forma auditiva, cabe destacar la existencia de herramientas software automatizadas para la realización de tales tareas.

Un ejemplo de ello es el software PAMGuard (Passive Acoustic Monitoring Guard) [10]. Esta iniciativa es mantenida por la unidad de investigación SMRU de la universidad de St. Andrews. El software contiene diversos módulos dedicados a una gran variedad de tareas tales como el uso de mapas, procesamiento de datos GPS o datos AIS, además de numerosos módulos con rutinas básicas de procesamiento de señal acústica y de imagen y detectores, localizadores y clasificadores de diferentes tipos de vocalizaciones de mamíferos marinos tales como clicks o whistles.

3.1.2 Sonidos generados por peces

De las aproximadas 33.000 especies de peces, al menos 800 pertenecientes a unas 100 familias diferentes producen sonidos [11]. Muy probablemente, un aumento de estudios en este campo incrementaría este número.

Los sonidos generados por los peces se producen en varios contextos diferentes, tales como en la alimentación (ruido generado al comer), apareamiento o

disputas. Algunos peces hembra utilizan sonidos para localizar a sus parejas [12].

Al igual que en cualquier otra fuente acústica, la caracterización de los sonidos producidos por peces se realiza a través del análisis de sus patrones temporales (duración y repetición) y frecuenciales, así como de su intensidad.

La mayoría de los sonidos generados por los peces tienden a ser sonidos pulsátiles de banda ancha, aunque hay algunos ejemplos de sonidos multi-armónicos. En la Figura 7 se muestran ejemplos de diferentes sonidos emitidos por peces.

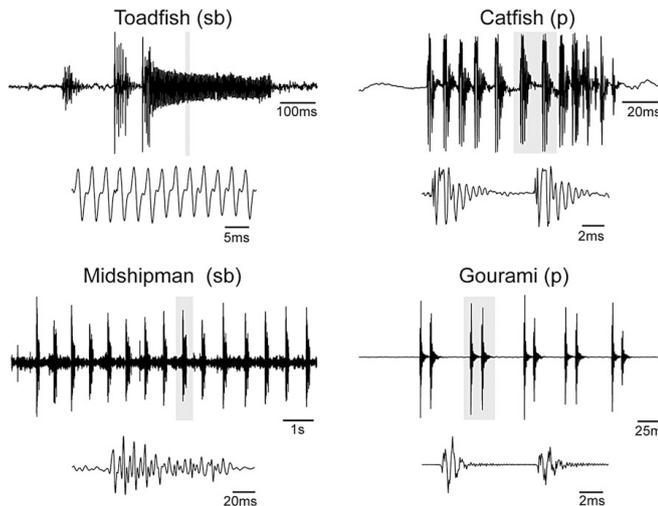


Figura 7. Ejemplos de diferentes sonidos emitidos por peces. Extraído de la referencia [13]

Respecto al dominio frecuencial, la mayoría de los sonidos emitidos por peces son de baja frecuencia (<1000 Hz), aunque en algunos casos pueden llegar hasta 8 kHz, o presentar características algo más complejas.

Las características acústicas de los sonidos emitidos por peces están altamente relacionadas con diferentes aspectos biológicos tales como su sexo o el estado de crecimiento y con otros parámetros ambientales, tales como la estación del año, ruido de fondo, etc., pudiendo cambiar en el mismo ejemplar dependiendo de dichas variables. Así, por ejemplo, en la Figura 8 se muestra la correlación entre el peso, sexo y frecuencia dominante en sonidos emitidos por *Corydoras paleatus* y cambios en las características tiempo-frecuencial en llamadas de corvina en cautividad.

Además de las diferencias de las características acústicas dadas por diferentes aspectos biológicos, ambientales o la funcionalidad (apareamiento, defensa territorial, etc.), estas características pueden cambiar dependiendo del ejemplar. En la Figura 9 se muestra los oscilogramas, espectrogramas y la potencia espectral de dos ejemplares de corvina machos en llamadas para el apareamiento.

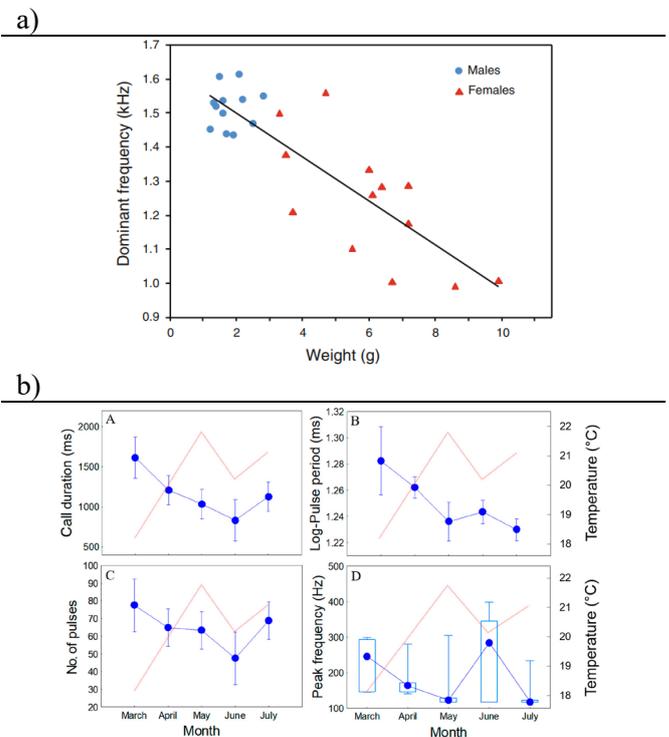


Figura 8. a) Correlación entre el peso, sexo y frecuencia dominante en sonidos emitidos por *Corydoras paleatus*; b) Cambios en las características tiempo-frecuencial en llamadas de corvina en cautividad. Extraído de las referencias [14] y [15] respectivamente.

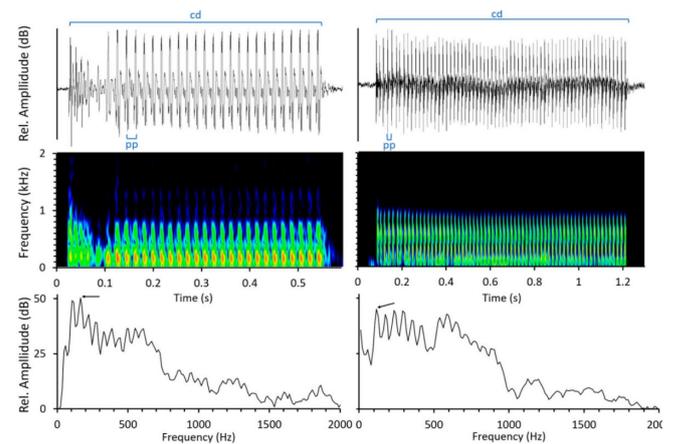


Figura 9. Características tiempo – frecuencial de llamadas de apareamiento de dos ejemplares macho de corvina con los mismos parámetros ambientales y mismas características fisiológicas. Extraído de la referencia [15].

Cómo se puede observar, el estudio y análisis de la contribución de este tipo de fuentes dentro de los paisajes sonoros submarinos es extremadamente complejo, debido a la variabilidad de las características acústicas de estas fuentes tanto inter como intra-especie.

3.1.3 Sonidos generados por invertebrados

Los sonidos generados por invertebrados pueden llegar a ser los mayores contribuidores de energía acústica en un mapa sonoro de zonas costeras. Sin embargo, y a excepción de algunas especies como el cangrejo pistola [16], [17] que han sido ampliamente estudiadas por la dominancia de los sonidos recogidos en mapas sonoros

de zonas costeras situadas en zonas de latitud media-baja, el sonido generado por invertebrados es el menos estudiado tanto en términos de generación como en percepción.

Algunas otras especies como langostas, erizos o algunos cangrejos también han sido estudiadas, sobre todo por su interés económico, sin embargo estas especies no son representativas de todos los hábitats bénticos [18], por lo tanto se necesita un mayor esfuerzo en la caracterización acústica de especies invertebradas como fuentes sonoras para mejorar el conocimiento de este tipo de hábitats a través de mapas sonoros.

En la referencia [18] se presenta un estudio en el que se realizaron medidas de al menos tres ejemplares de 20 especies diferentes de invertebrados. En la Figura 10 se muestra el esquema utilizado para la medida en tanques del sonido generado por diferentes especies de invertebrados, y la lista de especies incluidas en el estudio.

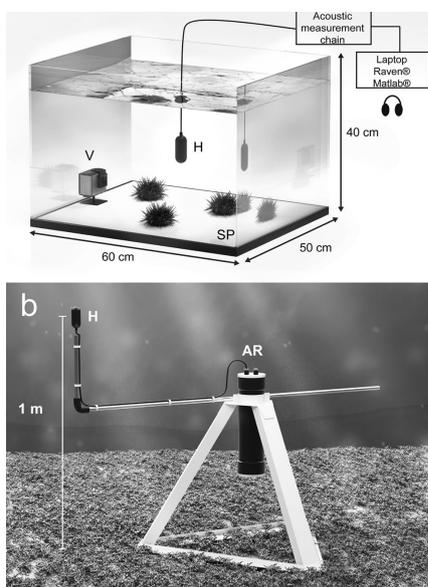


Figura 10. a) Esquema de experimentación en tanques y set-up para la medición de sonido generado por diferentes especies invertebradas. Extraído de la referencia [18].

En la Figura 11, se puede observar la forma de onda, espectrograma y espectro acústico del crustáceo *Maja brachydactyla* del sonido generado durante su alimentación.

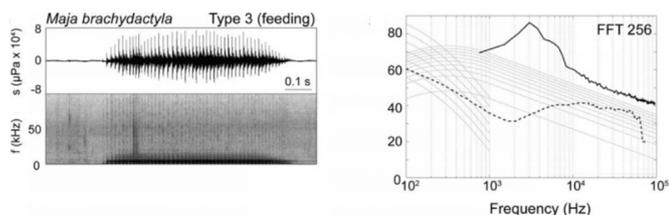


Figura 11. Sonido generado durante la alimentación del crustáceo *Maja brachydactyla*. Izquierda, forma de onda y espectrograma, derecha espectro acústico comparado con las curvas de Wenz. Extraído de la referencia [18].

3.2 Sonidos Geológicos

3.2.1 Lluvia y viento

Los sonidos geológicos más importantes son los generados por el efecto de la lluvia y el viento. El efecto sobre el ruido de fondo de estos dos fenómenos es el de un incremento de dicho ruido en toda la banda espectral conforme la densidad de lluvia y la velocidad del viento aumentan, por lo tanto, son clasificados como sonidos de banda ancha.

En la Figura 12 se puede observar cómo varían los niveles de presión sonora en diferentes condiciones atmosféricas.

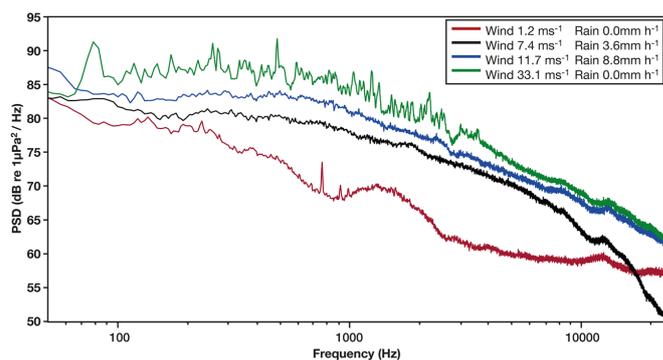


Figura 12. Variación de presión sonora con condiciones atmosféricas (viento y lluvia) en banda ancha. Extraído de la referencia [19].

3.2.2 Olas

El sonido ambiente generado por las burbujas y el spray relacionado con las olas se concentra en la región espectral comprendida entre 500 y 100.000 Hz.

En la Figura 13, se puede observar la potencia espectral de 100 bloques de 20 ms de duración grabados durante 5 eventos de ruptura de olas.

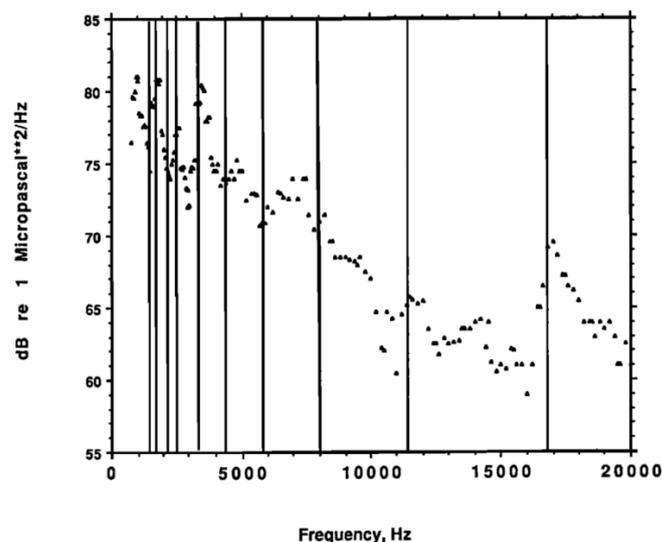


Figura 13. Potencia espectral de 100 bloques de 20 ms de duración grabados durante 5 eventos de ruptura de olas. Extraído de la referencia [20]

3.2.3 Ice Cracking

Los eventos relacionados con la rotura, fractura, colisión, derretido, etc. del hielo, generan sonidos submarinos. Así, por ejemplo, Greening en 1994 observó que el sonido generado por la rotura del hielo estaba uniformemente distribuido espacialmente y su nivel de fuente equivalía a unos 110 dB re $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ [21].

En la Figura 14, se puede observar la forma de onda y el espectrograma de una colisión de dos plataformas de hielo

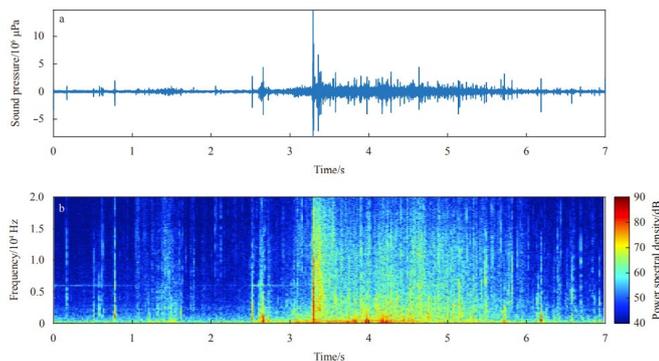


Figura 14. Forma de onda y espectrograma del evento de colisión entre dos masas de hielo. Extraído de la referencia [21].

El sonido característico de la rotura de hielo presenta sonidos impulsivos, con características frecuenciales en banda ancha pero con mayor concentración por debajo de los 3 kHz.

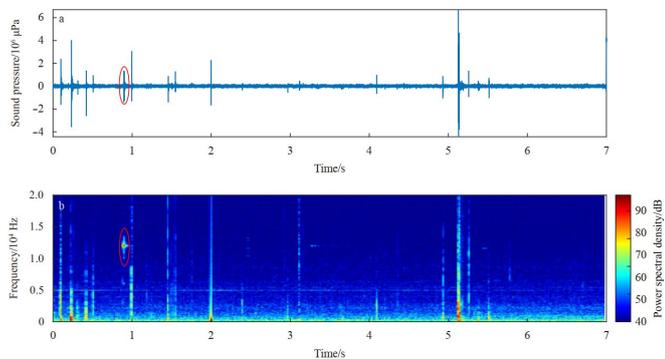


Figura 15. Forma de onda y espectrograma del sonido correspondiente a la quiebra de una masa de hielo, (el círculo denota el sónar de una embarcación cercana). Extraído de la referencia [21].

3.3 Sonidos Antropogénicos

Los sonidos antropogénicos se pueden dividir en función de la fuente en sonidos generados por:

- Actividades industriales.
- Transporte aéreo y marítimo.
- Investigaciones geofísicas.
- Sonares activos.
- Explosiones submarinas.
- Estudios oceanográficos científicos.

3.3.1 Actividades industriales

Principalmente existen dos actividades industriales diferenciadas realizadas en el medio marino que han recibido la atención debido al sonido generado durante su ejecución. Estas son los dragados y construcciones, y las perforaciones para la producción de gas y de petróleo.

Dragados

Los dragados marinos, construcción de túneles y varias actividades de construcción en y cerca del mar crean ruido submarino. Los dragados se utilizan para hacer más profundos canales y puertos, para crear plataformas terrestres o sumergidas y para minería submarina. El ruido generado puede exceder los niveles del ruido ambiente a largas distancias.

Malme y Krumhansl midieron ruido generado a 50 metros de una maquinaria de Robbins utilizada para construir un túnel de 8 metros. Los sonidos predominantes eran de banda ancha, estando los más fuertes por debajo de los 10 Hz, disminuyendo la energía al incrementar la frecuencia hasta 500 Hz. A mayor distancia, aparecieron fuertes componentes entre 30 Hz y 100 Hz debidos a efectos de resonancia relacionados con la profundidad del agua.

Perforaciones para producción de gas y petróleo

Las perforaciones se pueden realizar desde islas naturales o artificiales, plataformas o buques. Las perforaciones realizadas desde islas naturales o hielo generan un ruido muy bajo. La distancia audible suele estar en los 2 km trabajando a frecuencias de 200 Hz. En aguas árticas poco profundas, durante el invierno, se generan frecuencias por debajo de 350 Hz, atenuándose de 125 dB a una distancia de 130 m a 85 dB a una distancia de 2 km.

Las perforaciones desde islas artificiales producen un ruido notable, aunque sigue siendo bajo. Los tonos pueden llegar a ser detectados a 0,5 km sin perforación y 3,7 km perforando. Existe ruido asociado con el ensamblaje de elementos de las propias instalaciones, por ejemplo, tuberías conductoras, en las que se suele utilizar martillos industriales.

El ruido generado por plataformas de perforación no está muy estudiado. Se han realizado algunas medidas en las que se concluye que el ruido no es detectable con niveles del estado de mar mayor que 3.

Las perforaciones se pueden realizar en dos tipos de buques, semisumergibles o buques de perforación, siendo el ruido generado por buques de perforación es más alto. El ruido generado depende del tipo de maquinaria que se utiliza y de la antigüedad de la misma.

El ruido en la producción de gas y petróleo es muy bajo debido a que estas instalaciones tienen poca superficie en contacto con el agua.

En la Tabla 2 se muestran frecuencias y niveles de ruido generado en perforaciones y producciones de gas y petróleo.

Actividad	Frecuencia (Hz)	Nivel dB ref. 1 μ Pa	Distancia
Perforaciones (Islas artificiales)	20 - 100 20 y 40 predominantes	8 - 10 dB por encima ruido fondo	5 km
Instalaciones en plantas	30 - 40 y 100	131 - 135 100 - 106 Banda ancha	1 km
Plataformas perforación	5 (1,2 kHz más alta)	119 - 127	
Semisumergibles	29 y 70	125 y 154	13 - 15 m
Producción gas y petróleo	30 y 120	89 - 94	34 m

Tabla 2. Ruido submarino generado en perforaciones.

3.3.2 Transporte aéreo y marítimo

Plataformas Aéreas

La transmisión del sonido aire - agua modifica las características del sonido recibido bajo la superficie del mar. El nivel de sonido submarino generado por aviones depende de factores como: frecuencia, profundidad del receptor, profundidad del agua, altitud del avión, aspecto del avión y el nivel de fuente del avión. En la Tabla 3 se muestran ejemplos del nivel de ruido submarino generado por plataformas aéreas en función de la frecuencia y altitud.

Tipo de Aeronave (Hz)	Altitud (m)	Nivel recibido (dB ref a 1 μ Pa)	Nivel estimado de la fuente (dB ref @ 1 μ Pa - m)
Helicóptero BELL 212 (22Hz)	152	109	149
	305	107	151
	610	101	151
B-N Islander (70 Hz)	152	101	142
Twin Otter (82 Hz)	457	107	147
	610	100	150
P-3 Orion (56-80 Hz)	76	124	162
	152	121	162
	305	114	160
P-3 Orion (890-1120 Hz)	76	112	150
	152	107	148

Tabla 3. Ruido generado por aeronaves en función de la frecuencia y altitud.

Normalmente un pico de nivel recibido por un receptor disminuye cuando aumenta la altitud del avión o aumenta la profundidad del receptor. La dependencia con el aspecto del avión es tal que si el ángulo entre la línea de la aeronave y el receptor es mayor de 13° la mayoría de rayos son reflejados y no penetran en el agua para bajo niveles de estado del mar, fondos profundos o aguas con fondos no reflectantes. Por otro lado, si la

longitud de onda de las ondas acústicas emitidas es más grande que la longitud de onda de las olas de la superficie del mar, éste se comporta como una superficie completamente reflectante.

La profundidad y las características del fondo influyen en la propagación y en los niveles del ruido submarino. La propagación lateral es mejor en aguas poco profundas, especialmente cuando el fondo es reflectivo. Como resultado, el límite de 13° no es siempre el mismo, incluso el tiempo de pasada del avión medido con un receptor submarino se ve aumentado en aguas poco profundas por reflexiones en el fondo.

Los aviones utilizan máquinas de pistón o turbinas. Cada tipo de motor puede ser manejado con hélices o rotores (helicópteros) y turbinas turbojets o turbofans. Los sonidos de las maquinarias de pistón están dominados por la frecuencia de encendido del pistón, el cual causa una familia de tonos en el espectro (armónicos). Los motores de turbina están caracterizados por el silbido de las palas dentro de las diferentes fases del motor. Los tonos se producen desde pocos hertzios hasta frecuencias superiores a 1 kHz. Las fuentes primarias del ruido generado por aviones con turbinas turbojet o turbofan son las hélices y los rotores. El giro de las palas produce tonos con frecuencia fundamental que depende de la velocidad de giro y el número de palas. Los espectros del ruido generado por aviones y helicópteros generalmente están por debajo de los 500 Hz.

La duración de los sonidos recibidos por un receptor submarino es inferior a la del recibido por un receptor no submarino, así, por ejemplo, el helicóptero BELL 214ST es recibido en el aire 4 minutos antes de que pase sobre el receptor, mientras que en el agua es detectable 38 s @ 3 m y 11 s @ 18 m antes de que pase sobre el receptor. La duración aumenta al aumentar la altitud del avión, tendiendo a ser más tiempo audible en aguas profundas que en aguas poco profundas.

Plataformas Marítimas

El ruido generado por los buques es el que más contribuye a la contaminación acústica submarina. Los niveles y frecuencias de los sonidos generados dependen del tamaño y velocidad del buque, generándose ruido de banda ancha y de banda estrecha. Las fuentes típicas del ruido de banda ancha son las hélices / ejes (inferior a 100 Hz), ruido hidrodinámico y algunos sistemas de propulsión. Las fuentes típicas del ruido de banda estrecha son las bombas, motores, equipos de alimentación eléctrica y sistemas de propulsión.

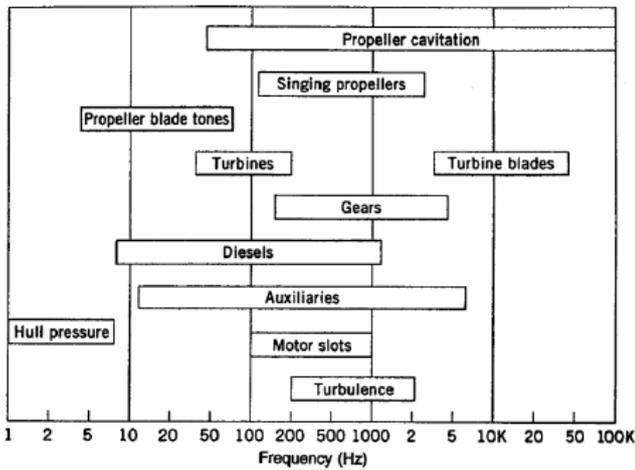


Figura 16. Rango de frecuencias radiadas por diferentes fuentes acústicas de buques.

3.3.3 Investigaciones Geofísicas

Las investigaciones geofísicas utilizan fuentes de sonido para generar ondas sísmicas. Este tipo de fuentes se caracterizan por generar un ruido de muy alta energía, baja frecuencia y corta duración. Este tipo de sonido es detectable a cientos de kilómetros de la fuente. Las fuentes más utilizadas son: cañones de aire (Air - Guns), Sleeve Exploders y cañones de gas (Gas - Guns) y Vibroseis.

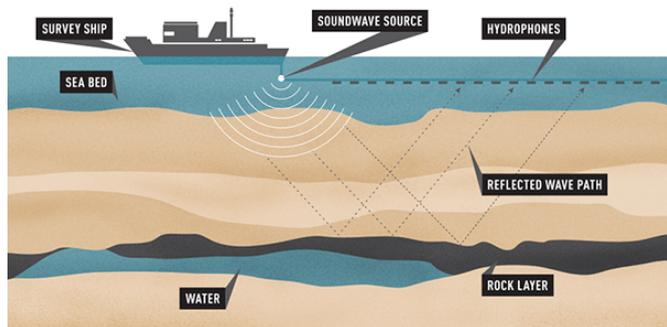


Figura 17. Ejemplo de una exploración geofísica con una fuente acústica. Extraído de la referencia [22].

En la Tabla 4 se muestra el nivel acústico medido de diferentes proyectores utilizados para exploraciones sísmicas.

Actualmente, los proyectores Air - Guns son los más utilizados. Generan pulsos cada 10 - 15 s. En algunas áreas, la energía de baja frecuencia puede viajar a largas distancias a través de los sedimentos del fondo, volviendo a la fuente a través del agua. La velocidad del sonido es mayor en el sedimento del fondo que en el agua, de hecho, un receptor situado a una distancia recibirá un pulso transmitido a través del fondo seguido del pulso transmitido a través del agua.

Los proyectores Sleeve Exploders y Gas - Guns se cargan con una mezcla de oxígeno y propano para generar el pulso sonoro. La señal resultante tiene características similares a las generadas por un cañón de

aire pequeño. Al igual que ocurre con los proyectores Air - Guns, al aumentar la distancia no sólo disminuye el nivel, sino que además aumenta la duración del pulso, de manera que altas frecuencias (200 Hz) en el generador, se reciben en el receptor como bajas frecuencias (70 Hz).

Tipo de Fuente	Profundidad (m)	Nivel dB ref 1 μ Pa @ 1 m
Array Air - Gun		
GSC 7900		259
ARCO 4000	10	255
GECO Array 3100	7,6	252
GSI Array Jonsson 200	6,1	249
SSL Array 1460	7,6	242
GECO 594 Subarray	8,2	235
Air - Gun Simple		
Pequeño	9,1	216
Mediano	9,1	225
Grande	9,1	232
Sleever Exploder		148 - 153 @ 8 km 115 - 117 @ 25 km
Gas - Gun		123 @ 0,9 km 117 @ 14,8 km

Tabla 4. Niveles de emisión de diferentes proyectores sísmicos utilizados para exploraciones geofísicas.

Vibroseis es un método utilizado en el hielo basado en un array de dispositivos hidráulicos que lo golpean. La frecuencia de las señales utilizadas es de 10 - 70 Hz, aunque los armónicos pueden extenderse hasta 1,5 kHz. Las señales generadas son transitorios de duración 5 - 20 s pudiéndose generar señales con niveles de 187 dB ref 1 μ Pa @ 1 m a 50 Hz durante un barrido de 10 a 65 Hz. El factor de atenuación es de 22,5 dB/km a 10 Hz y de 31,5 dB/km a 60 Hz.

Sónares Activos

Los sonares activos se basan en la emisión de un pulso y la medida del eco que se produce cuando el pulso rebota en una superficie. Se pueden clasificar atendiendo al tipo en: sonares de profundidad variable, comerciales para pesca, para medir corrientes e investigación marítima, y militares para la detección de buques, para la detección de objetos y utilizados en armas como torpedos.

Las frecuencias de los sonares van desde los pocos cientos de Hz para sonares de búsqueda de largo alcance hasta varios cientos de kHz para sonares utilizados en la búsqueda de minas, cartografía marina y en general sistemas que requieren discriminar pequeños objetos.

Los pulsos emitidos por sonares activos (Tabla 5) suelen tener un nivel alto. Por ejemplo, los sonares utilizados para cartografiar el fondo marino generan un pulso de

210-230 dB ref 1 μPa @ 1 m. La duración del pulso puede ser de entre unos pocos μs a algún segundo.

SONAR	Frecuencia (kHz)	Duración (ms)	Nivel (dB)
Profundidad Variable	12+	10-1000	180
Perfil del Fondo	0,4-30	0,1-160	200-230
Barrido Lateral	50-500	0,01-0,1	220-230
Navegación	7-60	3-40	180-200
Búsqueda y Vigilancia	2-57	4-1000	230+
Minas y detección de obstáculos	25-500	1-30	220+
Armas	25-200		200
Teléfono Submarino	5-11	Continuo	180-200

Tabla 5. Ruido generado por SONARES activos.

Explosiones submarinas

Las explosiones submarinas producidas por el hombre son las más potentes a excepción de las erupciones volcánicas submarinas o terremotos submarinos. Los pulsos de presión producidos generan un ruido capaz de provocar daños físicos o la muerte de mamíferos marinos. Incluso pequeñas detonaciones pueden ser detectables a cientos de km cuando se propagan en el canal sonoro. Cargas de profundidad (100 kg) detonadas en el canal sonoro profundo en Australia han sido detectadas en las Islas Bermudas.

Estudios oceanográficos

Algunos estudios científicos utilizan la energía acústica para analizar las características del fondo y el agua, siendo aquellos utilizados para analizar el fondo los que emplean mayor energía. También se utiliza la energía acústica para estudiar las pérdidas por transmisión del sonido y las propiedades de las masas oceanográficas.

Desde la WWII se han utilizado cargas de 0,9 kg para estudiar la propagación del sonido y las características del fondo. Esta carga situada a 18 o 244 metros de profundidad genera un pico de presión a una distancia de 1 km de 208 dB ref 1 μPa , los pulsos de burbujas tienen una frecuencia de 8 Hz y 50 Hz y el impulso estimado a 1 km es de 7,1 Pa. En acústica tomográfica se utilizan proyectores que generan niveles de presión de 165 dB ref 1 μPa @ 1 m para dispositivos de corto alcance y 190 – 220 dB ref 1 μPa @ 1 m para dispositivos de largo alcance. Las frecuencias de trabajo se encuentran entre los 50 Hz y los 200 Hz.

La acústica termométrica está especializada en estudios de largo alcance obteniendo la temperatura de los océanos basándose en la medida de la variación de la velocidad del sonido. En 1991 se realizó el The Heard Island Feasibility Test. Se generaron tres tipos de señales centradas en 57 Hz proyectadas en el canal sonoro a una profundidad de 175 m, cada media hora durante 7 días. Se utilizó un array de transductores que generaba niveles de 220 dB ref 1 μPa @ 1 m. Con esos niveles, se detectaron 160 dB a 1 km, 137 dB a 72 km a profundidad 80 m y 120 dB a distancias de 100 – 1000 km, dependiendo de la profundidad de los receptores. Las señales fueron detectadas hasta una distancia de 17.000 km.

3.4 Curvas de Wenz

Las curvas de Wenz [23] son extremadamente útiles para la predicción del nivel de ruido de fondo teniendo en cuenta sonidos geológicos así como el tráfico marino de origen antropogénico. En la Figura 18 se muestra las curvas de ruido en función de diferentes fuentes.

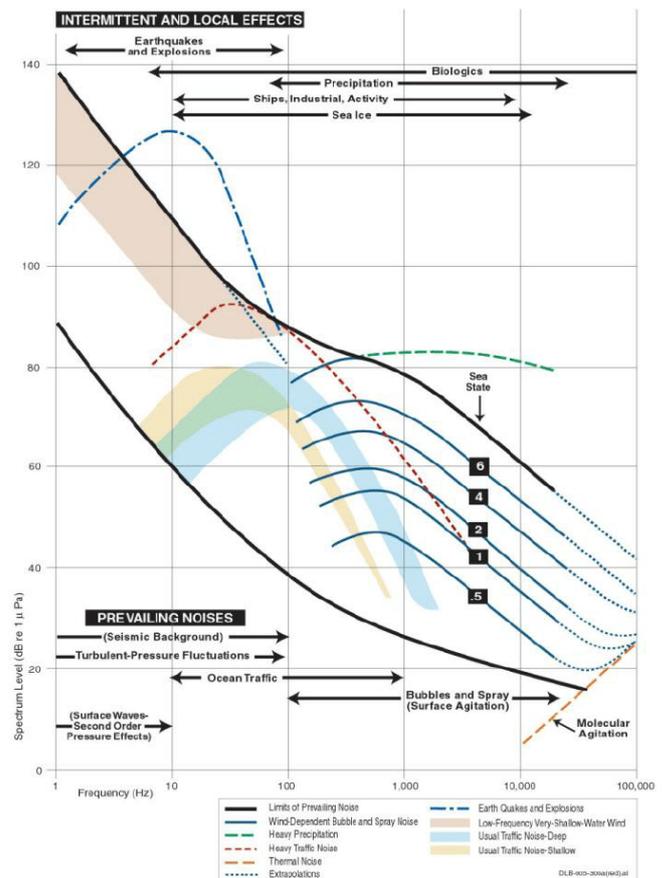


Figura 18. Curvas de ruido Wenz.

De acuerdo a las curvas de la Figura 18, el espectro se puede dividir en 5 zonas diferenciadas y caracterizadas por los tipos de fuentes dominantes, pudiéndose identificar las siguientes bandas:

- 1 – 10 Hz: Ruido de fondo dominado por sonidos sísmicos generados por terremotos o fluctuaciones de presión.
- 10 – 100 Hz: EL nivel de ruido depende principalmente de la densidad de tráfico relacionado a la actividad industrial.
- 100 – 1000 Hz: La principal fuente que contribuye al ruido de fondo es el ruido generado por el tráfico marino.
- 1 – 100 kHz: Las principales fuentes son la agitación de la superficie del agua así como la presencia de lluvia o vocalizaciones de mamíferos marinos.
- >100 kHz: Ruido de origen electrónico y ruido térmico.

3.5 Vibraciones

En el contexto de paisajes sonoros y del estudio de impacto sobre fauna marina y ecosistemas, cabe destacar que el sonido en forma de vibraciones de partícula que se propagan a través del agua ha sido mayoritariamente tenido en cuenta en la mayoría de los estudios y publicaciones prestando menos atención a la propagación de ondas acústicas en formas de ondas sísmicas por el lecho marino.

En cuanto a fuentes acústicas responsables de la transmisión de ondas acústicas a través del lecho marino, las más estudiadas son aquellas encontradas en la industria del gas y el petróleo (sección 3.3.1 y 3.3.3).

Sin embargo, prácticamente se pueden considerar todas aquellas mencionadas anteriormente y sobre todo en escenarios de aguas someras. Esto es debido a que las ondas acústicas propagadas por el agua pueden incidir en el fondo marino resultando en una transmisión de energía entre dos medios (tales como puede pasar por ejemplo entre el sonido propagado en el aire y una tela de araña).

Un ejemplo de ello pueden ser las ondas sísmicas inducidas por el sonido generado por buques (sobre todo de gran porte) en zonas costeras. En la Figura 19 se muestra los espectrogramas correspondientes al ruido radiado por un barco tipo crucero medido entorno del segundo 110. Nótese la recepción ligeramente temprana en el eje transversal y el eje vertical z debido a la mayor velocidad del sonido en el substrato que en el agua.

En la Figura 20, se muestran resultados del estudio realizado en la referencia [24], donde se realizó un análisis de la contaminación acústica submarina de acuerdo al criterio 1 de Descriptor 11 de la Directiva Marco sobre Estrategia Marina “*Introduction of energy, including underwater noise, is at levels that do not adversely affect the marine environment*” [25], en lo relativo a la relación entre los niveles de sonido acústicos y sísmicos en los tercios de octava centrados en 63 y 125 Hz, en una campaña de medidas acústico-sísmicas

utilizando el equipo avanzado de medida Multi-Influencia MIRS [26] fabricado por SAES.

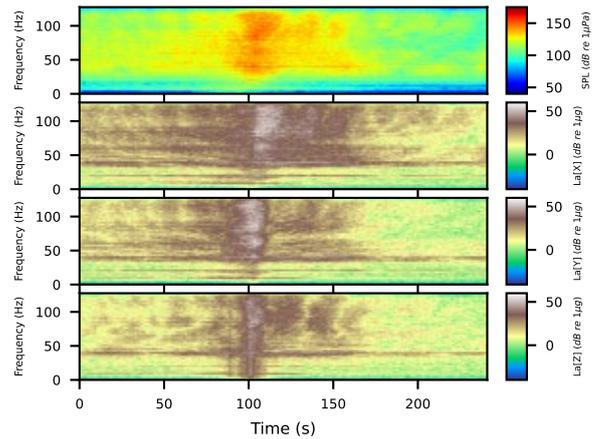


Figura 19. Espectrogramas correspondientes a la grabación del ruido radiado de un buque de tipo crucero en una zona de densidad de tráfico alta. De arriba a abajo: onda acústica transmitida por agua, onda acústica transmitida por el lecho marino (vibración) en los ejes horizontales X, Y y el eje horizontal Z. Nótese que los niveles son expresados en dB SPL re 1µPa y La dB re 1µg para niveles de vibración. Extraído de la referencia [27].

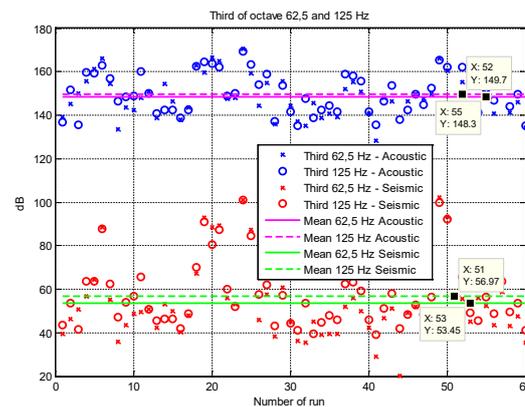


Figura 20. Niveles de presión sonora expresados en dB re 1µPa y niveles sísmicos (módulo de 3 ejes) expresados en dB re 1µg.

4 Camino Acústico – Propagación

Esta sección está principalmente basada en el documento realizado por National Physics Laboratory relativa a modelos de propagación de acústica submarina [28].

Los modelos de propagación acústica se han utilizado durante mucho tiempo en multitud de aplicaciones tales como en el ámbito militar, guerra antisubmarina para la predicción de detección o contradetección por parte de plataformas o dispositivos acústicos submarinos adversarios, o la monitorización acústica pasiva en el estudio biota marina, etc.

Generalmente el resultado de un modelo de propagación es la serie temporal acústica en un determinado receptor resultante de la acción de una determinada fuente, o puede ser un mapa de ruido, que básicamente muestra de

manera geoespacial los niveles sonoros de una determinada área o zona de forma cuantitativa.

Para ello, los modelos de propagación resuelven las pérdidas por transmisión (Transmission Loss, TL) sufridas para una onda acústica en un determinado escenario. Algunas de las características de dicho escenario que afectan a las pérdidas TL se muestran en la Tabla 6.

Elemento	Parámetro
Volumen	Perfil de velocidad (SVP)
	Perfil de atenuación
	Características de reflexión y dispersión
Superficie de los límites	Rugosidad de superficie
	Burbujas
	Efecto Doppler
Lecho marino	Coefficientes de reflexión
	Batimetría
	Rugosidad del fondo y el substrato marino

Tabla 6. Parámetros importantes en la resolución de las pérdidas de transmisión en un escenario subacuático de 4 capas (Aire, Agua, Fondo marino, Subfondo)

Para el cálculo de las pérdidas por propagación TL, los modelos de propagación generalmente resuelven la ecuación de onda o ecuación de Helmholtz.

Los modelos de propagación se pueden dividir principalmente en tres tipos diferentes atendiendo a:

- Las características frecuenciales de la fuente sonora.
- La dependencia de las características ambientales en la región de la propagación.
- La profundidad de agua.

También se puede realizar una división dependiendo de los métodos utilizados para la resolución de la ecuación de Helmholtz, en:

- Trazado de Rayos
- Modo Normal
- Ecuación parabólica
- Integración del número de onda
- Flujo de Energía
- Elementos Finitos

Cada uno de los métodos son más adecuados que otros dependiendo de varios parámetros que definen la región de propagación. Una guía simplificada, basada en las características frecuenciales de la fuente sonora y la profundidad de agua se muestra en la Tabla 7.

A continuación, se detallan algunas consideraciones importantes para el adecuado uso de los distintos modelos de propagación.

Método	AS-BF	AS-AF	AP-BF	AP-AF
Trazado de Rayos	1	3	2	3
Modo Normal	3	2	2	1
Integración del número de onda	3	3	3	2
Ecuación parabólica	3	2	3	1
Flujo de Energía	3	3	2	2

Tabla 7. Adecuación de métodos de modelos de propagación acústica para diferentes rangos de frecuencia y profundidad de agua. AS: Aguas Someras; AP: Aguas Profundas; BF: Baja Frecuencia; AF: Alta Frecuencia.

4.1 Modelo de Fuente Sonora

Un modelo de fuente sonora intenta describir el comportamiento de dicha fuente en un escenario determinado lo más fielmente posible. Así, por ejemplo, muchos de los problemas en donde se utilizan modelos de propagación sonora para su resolución, permiten realizar suposiciones que simplifican el comportamiento de dicha fuente. Una de las suposiciones más comunes es la de tomar una fuente sonora como un monopolio acústico puntual en escenarios donde la distancia entre emisor y receptor hacen que desde el punto de vista del receptor, toda la energía acústica es radiada de un punto.

Sin embargo, estas suposiciones deben de ir acompañadas de medidas correctoras que compensen tales simplificaciones. Por ejemplo, si se toma una fuente como una fuente puntual su nivel de fuente debe ser correctamente estimado teniendo en cuenta esta simplificación por ejemplo teniendo en cuenta la absorción del agua, o el posible efecto de la reverberación en la medición del nivel de fuente.

Existen diversos estudios en modelización de fuentes sonoras entre los que destacan los trabajos realizados en torno a modelos de barcos [29], [30], [31], [32], [33].

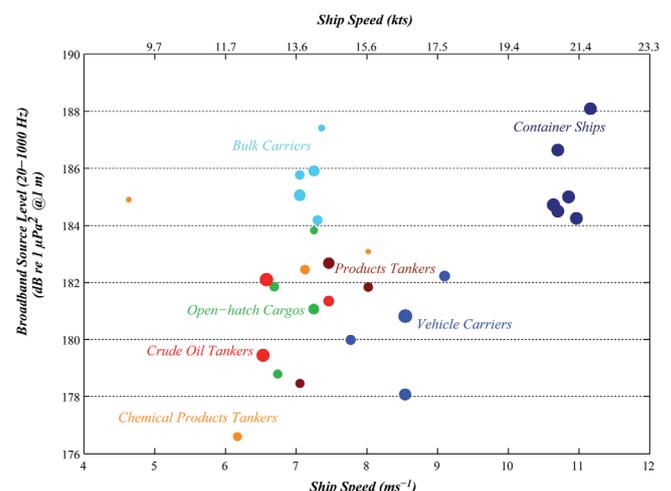


Figura 21. Nivel de fuente sonora en función de la velocidad del barco. Extraído de la referencia [30].

Otras típicas fuentes sonoras, tales como los airguns mencionados en la sección 3.3.3 también han sido objeto de estudio en términos de modelización de fuente sonora [34], [35].

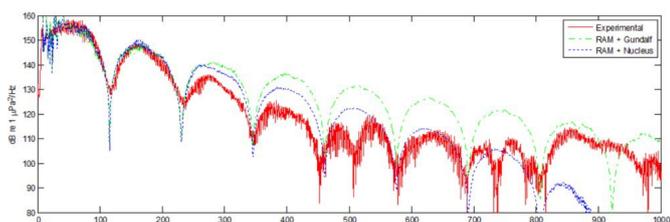


Figura 22. Comparación espectral de dos modelos de fuente (airgun) + Modelo de propagación RAM (ecuación parabólica) con medidas reales. Extraído de [34].

Debido a los altos niveles de presión sonora alcanzados en el proceso de clavado de pilotes (pile driving) para la instalación de diversas plataformas marinas destinadas a la prospección petrolífera o a molinos de viento “offshore”, esta acción también ha sido objeto de estudio en términos de modelización acústica [36], [37], [38], [39].

En la Figura 23 se muestra una comparación de diferentes modelos desarrollados por diferentes instituciones incluidas en la referencia [39].

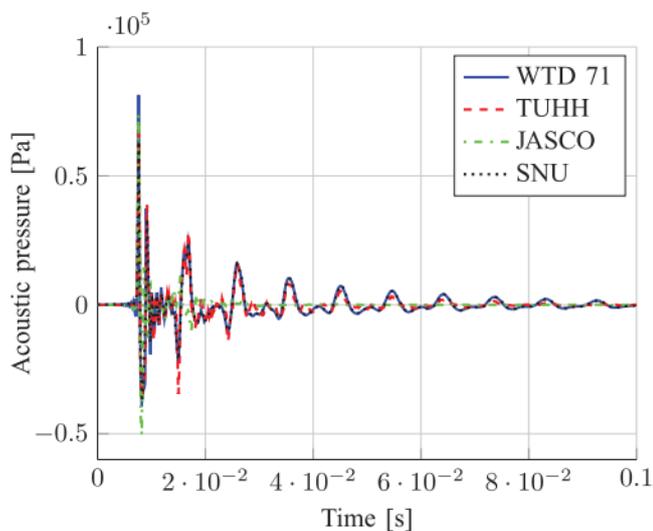


Figura 23. Resultados de diferentes modelos de clavado de pilotes por diferentes instituciones enmarcados en el benchmarking realizado en [39]. Figura extraída de la referencia [39].

4.2 Modelo Ambiental

Por modelo ambiental, se refiere a aquellas características acústicas propias de la región de propagación que afecten a la propagación del sonido. Estas características pueden variar en el espacio y tiempo, por ejemplo, el perfil de velocidad en una columna de agua puede variar según la temperatura, y por lo tanto variará según la estación del año.

4.2.1 Batimetría

La batimetría es una entrada muy importante para el cómputo del TL a través de un modelo de propagación, sobre todo en zonas costeras con poca profundidad de agua o en aquellas zonas continentales cercanas a llanuras abisales donde el talud continental puede constituir una barrera muy importante para el sonido.

Debido al incremento de importancia de este parámetro conforme la profundidad de la columna de agua disminuye, en determinadas ocasiones es importante tener en cuenta las mareas locales que origina cambios de profundidad.

Datos batimétricos se pueden obtener a través de diferentes portales tales como GEBCO (<http://www.gebco.net/>), o EMODNET (<https://www.emodnet-bathymetry.eu/>).

4.2.2 Propiedades del fondo marino

Las propiedades acústicas del fondo marino son especialmente importantes en escenarios de aguas someras, ya que, en este ambiente, las reflexiones generadas entre la capa superior (interfaz aire-agua) y el fondo marino, forman un campo reverberado cuyas características depende de entre otros factores, las propiedades de reflexión y absorción de sonido del fondo marino.

En este caso, existe dificultad en encontrar datos sobre materiales presentes en la superficie del fondo marino así como en datos de sus propiedades acústicas confiables.

4.2.3 Perfil de velocidad del sonido

El perfil de sonido es sin duda una de las características más importantes a la hora de realizar una simulación de propagación de sonido en el agua, es comúnmente denominado por sus siglas en inglés (SVP, Sound Velocity Profile)

El perfil de sonido suele ser expresado en función de la profundidad y depende de la salinidad, temperatura y presión.

Un cambio de velocidad del sonido significa un cambio de trayectoria en la propagación de la energía acústica, pudiendo ocurrir fenómenos tales como los canales acústicos, generados por el “doblamiento” de rayos acústicos haciendo que estos queden atrapados en ciertas zonas de profundidad.

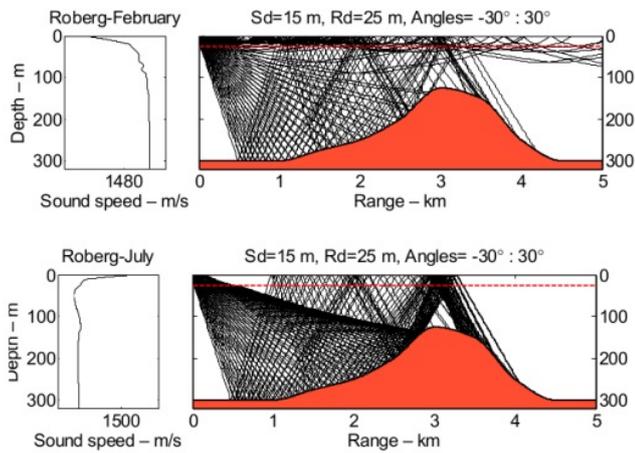


Figura 24. Resultado de modelo de propagación de trazados de rayos con una batimetría dada, misma fuente sonora pero diferente perfil de velocidad. Imagen extraída de la referencia [40].

El perfil de velocidad, se puede estimar mediante fórmulas semi-empíricas como la de Mackenzie [41] o la reconocida como el algoritmo estándar internacional debido a Chen & Millero y reformulada posteriormente por Wong and Zhu en [42].

El perfil de velocidad también puede ser medido in-situ mediante sondas que miden la conductividad, temperatura y profundidad, comúnmente llamadas sondas CTD (Conductivity, temperature, Depth).

4.2.4 Superficie del mar

La “rugosidad” en la superficie del mar, así como las burbujas generadas por la acción del viento tienen un efecto sobre la propagación del sonido sobre todo en rangos de frecuencia medio-altos (≥ 1 kHz) [43].

5 Receptor – Audiología y Psicoacústica

Atendiendo a los tres objetos o elementos de ambas metodologías presentadas para el análisis de impacto medioambiental, uno de dichos objetos fundamentales es el conocimiento de los efectos del sonido sobre la fauna marina.

En el estudio de este objeto o componente están implicadas áreas de conocimiento como la psicoacústica y la audiolgía, en este caso aplicada a especies marinas. Estas áreas de conocimiento abarcan desde el funcionamiento de los órganos sensoriales encargados de la percepción auditiva (desde el transductor hasta el procesamiento de sonidos a nivel cerebral) hasta cambios en funciones básicas tales como comunicación, búsqueda de comida o apareamiento.

Debido a que la psicoacústica y la audiolgía han sido y siguen siendo ampliamente estudiadas en el ser humano [44] y además, debido a que gran parte de las estructuras del oído medio e interno son compartidos por los mamíferos, muchos conceptos que se manejan dentro de

estas áreas son extraídos del estudio del impacto del ruido y percepción de sonido en seres humanos, tales como PTS, TTS o NITS; Cambios permanentes o temporales de límites auditivos, enmascaramiento, etc.

Así, gran parte de los estudios sobre la audición en animales marinos (Figura 28) y el impacto de ruido en animales marinos se ha centrado en mamíferos marinos [45] [46].

Con menor representación en cuanto a número de estudios de efectos del sonido sobre ellos, se encuentran los peces y otros vertebrados no mamíferos y los invertebrados.

En general, cabe esperar que el sonido pueda tener un efecto negativo sobre cualquier especie animal que utilice el sonido como una información sensorial más para entender el contexto en el que viven. Cabe destacar que cuando se utiliza el término sonido, no sólo se limita a ondas acústicas que se propagan en aire, sino también en forma de vibraciones por el fondo marino.

Por ejemplo, muchas especies (sobre todo vertebrados y cefalópodos) utilizan las vibraciones en el substrato del lecho marino en el mismo contexto que utilizan la visión, el oído, el tacto y el olfato [47]. Invertebrados benthicos tales como muchos crustáceos son también capaces de detectar vibraciones y sonido transmitido a través del lecho marino [22]. Es decir, la propagación de ondas acústicas por el lecho marino es utilizado y explotado por muchas especies marinas como una señal más a procesar para entender mejor el contexto en el que se encuentran.

Como es de esperar, las habilidades de producción de ruido y de escucha en las especies están muy relacionadas. Las características de percepción son generalmente mayores que aquellas relacionadas a la producción, ya que el sentido auditivo está muy relacionado con habilidades para la supervivencia a posibles predadores y también con las características acústicas del hábitat de cada especie.

Así, se pueden hacer distinción de habilidades auditivas agrupadas de la misma manera que se realiza en la sección 3.1.

5.1 Mamíferos Marinos

Los mamíferos marinos han sufrido adaptaciones al medio acuático que son reflejados en todas las estructuras del oído, especialmente en el oído externo y el oído interno.

Sin embargo, datos recogidos recientemente sugieren que los mamíferos marinos todavía retienen oídos medios con aire en su cavidad, y fundamentalmente los mismos componentes en el oído interno tal y como se muestra en la Figura 25.

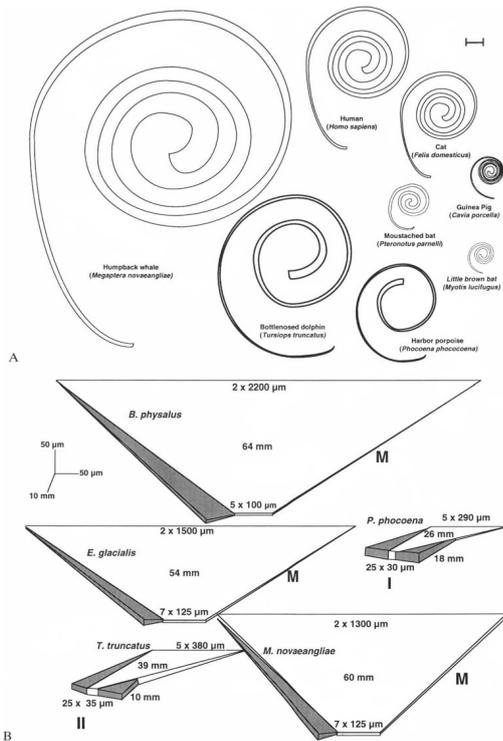


Figura 25. Representaciones en 2D de varias membranas basilares (estructura tonotípica dentro de la cóclea) en diferentes especies de mamíferos. Figura extraída de la referencia [45].

En cetáceos, lo más probable es que el sonido llegue al oído a través de tejidos que están conectados al oído medio, por lo tanto, estos tejidos harían la función del pabellón auditivo y del canal auditivo (oído externo) en seres humanos. De hecho, en [48] se mostró que ciertas estructuras pre-mandibulares en cetáceos tienen ciertas formas estructurales cuya función es la misma que el pabellón auditivo en seres humanos. Incluso, estos tejidos están compuestos de ciertas estructuras lipídicas cuya impedancia acústica coincide con la impedancia acústica del agua [49].

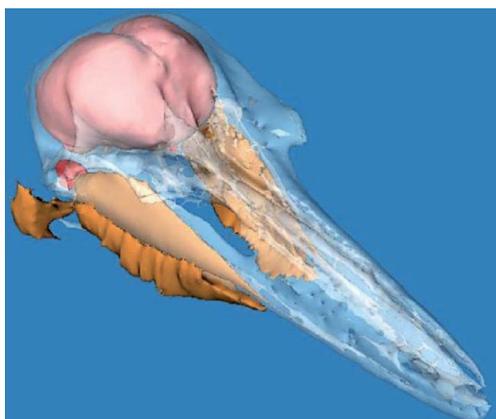


Figura 26. Reconstrucción 3D de la cabeza de un delfín de nariz de botella donde se puede apreciar la localización del oído interno y de los tejidos lipídicos especiales. Extraído de la referencia [50].

Al menos en odontocetos modernos, las estructuras del oído medio y la del oído interno, siendo como se ha mencionado anteriormente básicamente las mismas, se han modificado para adaptarse a las propiedades acústicas del agua. Por ejemplo, la membrana timpánica

no se encuentra dentro de la cavidad craneal, como en el caso de mamíferos terrestres, sino en una cápsula exterior suspendida por ligamentos, sin conexiones óseas con elementos capaces de transmitir vibraciones a la misma. Esto ofrece dos ventajas en un ámbito subacuático. La primera es que la distancia entre los dos oídos (medio e interno) se incrementa, aumentando así las diferencias interaurales mejorando las pistas temporales y de amplitud, adaptándose a una velocidad del sonido mayor. Por otro lado, al estar aisladas mecánicamente de estructuras con mayor rigidez (huesos) evitando la transmisión de vibraciones a estos órganos mejoran la relación señal ruido. Ambas adaptaciones permiten una mejor localización de fuentes sonoras, esenciales en la ecolocalización utilizada en estos animales. Además, en el caso de los odontocetos, la membrana timpánica se ha reducido de tamaño y tanto ella como las estructuras del oído medio se han rigidizado, en un orden de 6 veces la de la mayoría de los animales terrestres, mostrando así una especialización en altas frecuencias.

En el caso de los misticetos, la especialización ha ocurrido hacia el otro lado del espectro frecuencial, desarrollando grandes membranas timpánicas y gruesas, que además de prevenir posibles perforaciones del tímpano debido a cambios de presión bruscos, se acopla perfectamente a una cavidad del oído medio muy grande. Así las capacidades auditivas de los misticetos resaltan por la baja frecuencia (infrasonidos) al que son sensibles.

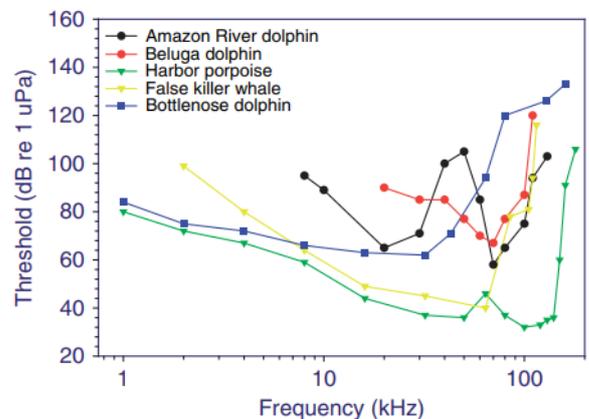


Figura 27. Ejemplos de límites audibles en algunas especies de mamíferos marinos. Extraído de la referencia [50].

En el caso de los pinnípedos, estos, al ser animales semiacuáticos, presentan adaptaciones menos extremas que las presentadas en los odontocetos y misticetos. Por ejemplo, el pabellón auditivo se ha reducido o casi ha desaparecido en algunas especies, pero el canal auditivo está presente y sigue siendo completamente funcional para la audición en aire. Algunos pinnípedos como el león marino han desarrollado un cartílago capaz de ocluir el canal auditivo cuando lo necesitan, aunque se desconoce si una vez ocluido, éste queda con agua, o con aire dentro. En lo que respecta a sus oídos internos, presentan básicamente las mismas características que la mayoría de los mamíferos terrestres con alguna

evidencia de extensión ultrasónica o infrasónica en algún caso [51].

En la Figura 28b) se muestra una comparativa entre las habilidades auditivas subacuáticas entre humanos y una especie de odontoceto y un pinnípedo.

a)



b)

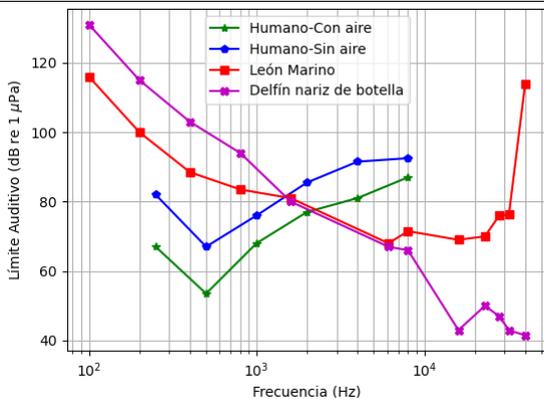


Figura 28.a) Buceador participando en un experimento de audición subacuática. [52]. b) Comparativa de límites auditivos de diferentes mamíferos. Líneas rojo y magenta corresponden al león marino y al delfín de nariz de botella. Líneas verde y azul corresponden a seres humanos bajo el agua con y sin aire en el canal auditivo. Datos obtenidos de las referencias [53] [54] [55].

5.1.1 Ponderaciones M

Las ponderaciones temporales o frecuenciales tienen la finalidad de reflejar con mayor exactitud la percepción sonora de un sonido determinado. En humanos, la ponderación frecuencial más famosa es la ponderación frecuencial A. Su uso es reconocible al ver cualquier nivel de presión sonora expresado en decibelios A (dBA).

En [56], se sugiere una ponderación frecuencial para diferentes especies y viene dada por:

$$W_l(f) = K + 20 \log_{10} \left[\frac{b^2 f^2}{(a^2 + f^2)(b^2 + f^2)} \right]$$

Dónde:

W_l Amplitud de ponderación

f Frecuencia

- a Frecuencia de corte inferior – Tabla 8
- b Frecuencia de corte superior – Tabla 8
- K Ganancia – Tabla 8

Grupo Funcional Auditivo	K (dB)	a (Hz)	b (Hz)
Cetáceos BF	0	7	22000
Cetáceos MF	0	150	160000
Cetáceos AF	0	200	180000
Focas (en agua)	0	75	75000
Focas (en aire)	0	75	30000
Pinnípedos (en agua)	0	100	40000
Pinnípedos (en aire)	0	100	30000
Tortugas Marinas	0	10	2000

Tabla 8. Parámetros para el cálculo de la ponderación frecuencial correspondiente a cada grupo de especies.

5.2 Peces y vertebrados

Los sistemas auditivos de peces cartilaginosos, tales como tiburones o rayas o de los peces óseos tienen muchas similitudes con las de otros vertebrados terrestres. El oído interno presenta tres canales semicirculares utilizados para determinar la aceleración angular. También se encuentran unos órganos otolíticos que son los encargados, en el caso de los peces, de proveer del sentido de la audición [57].

La audición en peces hace uso de células ciliares, así como en la mayoría de los vertebrados terrestres incluyendo las del ser humano. Además de células ciliares, en los peces cartilaginosos éstas células tienen superpuesta una masa de cristales de carbonato de calcio embebidos en una matriz gelatinosa. Esta masa en el caso de los peces óseos se fusiona en una sola estructura densa llamado otolito.

De manera similar a la audición en los peces, resulta cuando la energía sonora incide sobre el cuerpo del pez, haciendo que se muevan tejidos alrededor de los otolitos que son más densos y por lo tanto se mueven con menor facilidad. Los haces que contienen a las células ciliares se encuentran acoplados a dichos otolitos, por lo que el movimiento relativo entre los tejidos del pez y estos haces, resultan en la estimulación de las células ciliares y disparando la detección del sonido.

Las habilidades auditivas de algunos peces, representados por sus audiogramas se muestran en la Figura 29.

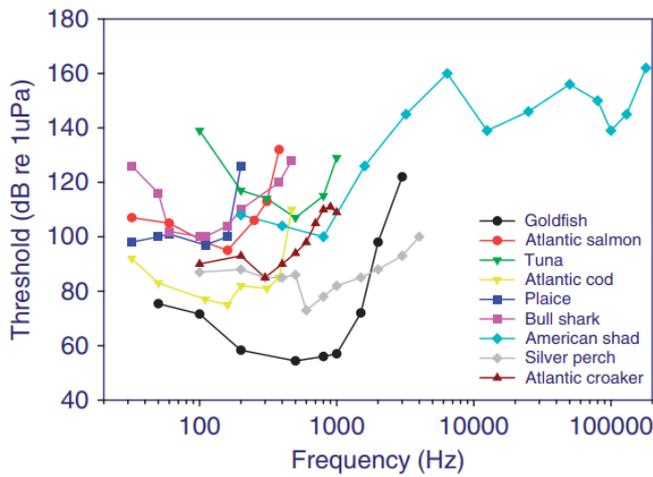


Figura 29. Límites sonoros para algunas especies de peces óseos y cartilagosos. Extraído de la referencia [50].

5.3 Invertebrados

En cuanto a invertebrados no artrópodos, hay 3 factores que hay que tener en cuenta a la hora de analizar su sistema auditivo:

1. La gran mayoría de estos invertebrados son acuáticos
2. No disponen de cavidades de aire en sus estructuras corporales capaces de detectar variaciones de presión sonora.
3. Con pocas excepciones, la mayoría de los invertebrados se encuentran en contacto con un substrato que no sigue los movimientos del agua que le rodea.

La falta de espacios con aire en el cuerpo de los invertebrados ha llegado a pensar que so “sordos”. Sin embargo, este tipo de animales son capaces de percibir las vibraciones en forma de desplazamiento de partícula tal como hacen los cefalópodos [58].

Debido a la gran cantidad de especies y a los pocos estudios realizados al respecto, es difícil definir en términos generales el sistema auditivo de los invertebrados [59].

Aun así, en [58] se mencionan dos posibles sistemas receptores auditivos, sistemas receptores superficiales localizados sobre el cuerpo y el estatocisto, que es un sistema encargado del equilibrio.

Los sistemas receptores superficiales, son conocidos como sistemas receptores hidrodinámicos, y serían encargados de percibir vibraciones y movimientos relativos del agua. Estos sistemas se pueden comparar a las líneas laterales existentes en algunos peces y anfibios. Estos sistemas presentan células ciliares sensitivas

El estatocisto tiene muchas similitudes con el oído interno de los vertebrados. De acuerdo con la referencia [59], exceptuando a cefalópodos, no existen datos sobre

la sensibilidad acústica de este sistema en otras especies de invertebrados.

Efectivamente, los cefalópodos son capaces de percibir vibraciones acústicas propagadas en el agua. El estatocisto es el encargado de la detección del desplazamiento de partícula [60].

En la Figura 30a se muestra un modelo de macula/estatolito (sistema que se cree responsable del sistema de recepción de movimiento) basado en un sistema oscilatorio de segundo orden. En la Figura 30b, se presentan los resultados de la simulación de dicho modelo con datos de rigidez, masa y amortiguamiento extraídos de estudios morfológicos de varias especies, y los resultados experimentales correspondientes a la exploración de los límites auditivos de diferentes cefalópodos (se muestra la especie *Octopus Vulgaris*).

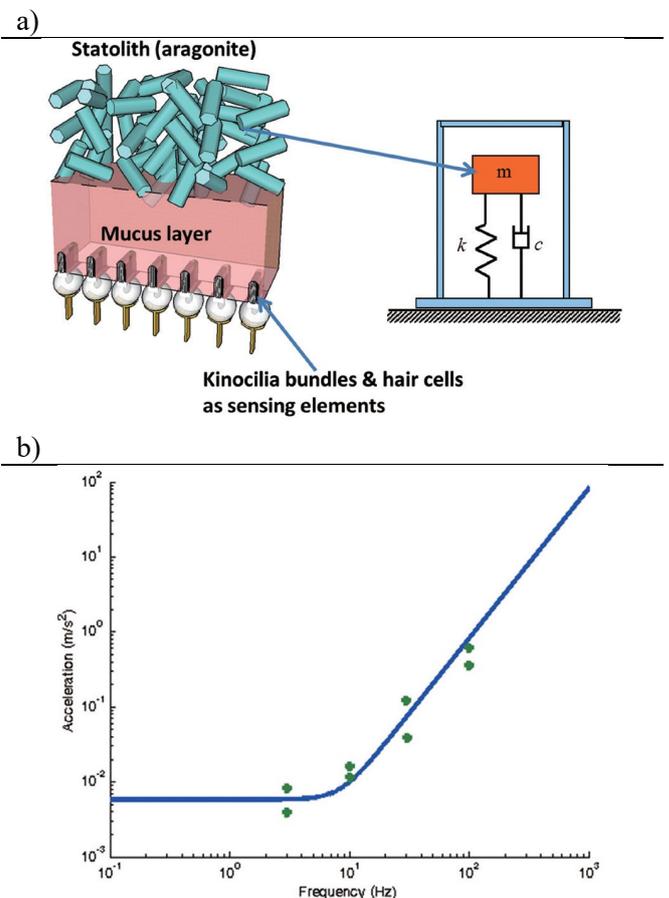


Figura 30. a) Modelo de Sistema de percepción de desplazamiento de partícula en cefalópodos. b) Comparativa de límites auditivos experimentales (puntos verdes) y teóricos basados en el modelo (línea azul) para la especie *Octopus Vulgaris*.

5.4 Efectos del ruido sobre la fauna marina

Los efectos del ruido (sobre todo antropogénico) la fauna marina se puede dividir en 5 tipos de daños diferentes, de mayor a menor gravedad:

1. Lesión
2. Respuesta conductual
3. Enmascaramiento

4. Cambio temporal de límite audible (TTS)
5. Respuesta de estrés fisiológico

Lesión

Se refiere a cualquier tipo de lesión física, ya sea relativa al sistema auditivo o a cualquier tipo de tejido u órgano. Un cambio de los límites audibles permanente (PTS) se considera una lesión, ya que este cambio muy probablemente sea la consecuencia de un daño en algún órgano o sistema relacionado con el procesamiento del sonido.

Respuesta Conductual

Se refiere a cualquier tipo de cambio de comportamiento en el animal debido al ruido. Por ejemplo, un cambio en la localización de búsqueda de comida, o de apareamiento. Estos efectos pueden darse muy lentamente y por lo tanto son difíciles de detectar y atribuir a un cierto estímulo de forma inmediata.

Enmascaramiento

Se refiere a la falta de percepción de algún tipo de estímulo sonoro debido a la cercanía de otro estímulo de mayor intensidad que “oculta” el otro más débil. El enmascaramiento puede ocurrir tanto en el dominio temporal como en el dominio frecuencial.

Cambio temporal de límite audible (TTS)

Se refiere a una degradación de las capacidades auditivas que tienen una duración determinada en el tiempo y es reversible.

Respuesta de estrés fisiológico

Se refiere al aumento de los niveles de estrés en el animal, y esto puede ocurrir debido a por ejemplo, similitudes entre sonidos antropogénicos y sonidos de predadores, o estrés provocado por un daño fisiológico o enmascaramiento.

Todos estos efectos han sido observados y estudiados en mamíferos marinos [61], [62] [63]. [64].

Sin embargo, en el caso de peces y vertebrados marinos, todavía no está claro de que los efectos del ruido sean los mismos que aquellos observados en los mamíferos. Aun así, es razonable pensar que sí, al menos de forma similar, ya que, como se ha mencionado anteriormente, muchos de los mecanismos subyacentes al sentido auditivo son compartidos por los mismos [65].

En el caso de los invertebrados, hay indicios de efectos de enmascaramiento, así como de la generación de estrés tras la exposición a altos niveles de sonido, en especial sonido de baja frecuencia, generados por tráfico marino, o derivados de la construcción y algunos tipos de sónar [66]. Respecto al efecto del sonido en algunos invertebrados, cabe destacar que algunas especies de calamar, y pulpos no han mostrado reacciones ante la

exposición al ruido, sin embargo, dejaron de comer o aparearse después de dicha exposición [67].

Además, en el caso de los invertebrados es de especial interés el impacto de las actividades humanas que generan ondas acústicas sísmicas que se propagan por el lecho marino u otros parámetros acústicos tales como la velocidad de partícula más que la presión sonora [67].

6. Referencias

- [1] WODA, «Technical Guidance on Underwater Sound,» 2013.
- [2] A. Popper, A. D. Hawkins y F. Thomsen, «Taking the Animal's Perspective Regarding Anthropogenic Underwater Sound,» *Trends in Ecology & Evolution*, 2020.
- [3] S. Guan y T. Brookens, «The Use of Psychoacoustics in Marine Mammal Conservation in the United States: From Science to Management and Policy,» *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, nº 507, 2021.
- [4] B. C. Pijanowski, L. J. Villanueva-Rivera, S. L. Dumyahn, A. Farina, B. L. Krause, B. M. Napoletano, S. H. Gage y N. Pieretti, «Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape,» *BioScience*, vol. 61, nº 3, pp. 203-216, 2011.
- [5] Thomsen, F., Mendes, S., Bertucci, F., Breitzke, M., Ciappi, E., Cresci, A. Debusschere, E., Ducatel, C., Folegot, F., Juretzek, C., Lam, F-P., O'Brien, J., d. Santos y M. E., «Addressing underwater noise in Europe: Current state of knowledge,» Future Science Brief 7 of the European Marine Board, Ostend, 2021.
- [6] C. Erbe, A. N. Gavrilov, S. Madhusudhana y A. Verma, «The underwater soundscape around Australia,» de *ACOUSTICS*, Brisbane, 2016.
- [7] B. Krause, *The Great Animal Orchestra*, Little Brown And Company, 2012.
- [8] C. Erbe, R. Dunlop, K. C. S. Jenner, M.-N. M. Jenner, R. D. McCauley, I. Parnum, M. Parsons, T. Rogers y C. Salgado-Kent, «Review of Underwater and In-Air Sounds Emitted by Australian and Antarctic Marine Mammals,» *Acoustics Australia*, vol. 45, pp. 179-241, 2017.
- [9] «Recognition of Frequency Modulated Whistle-Like Sounds by a Bottlenose Dolphin (*Tursiops truncatus*) and Humans with Transformations in Amplitude, Duration and Frequency,» *PLoS ONE*, vol. 11, nº 2, p. 23, 2016.
- [10] PAMGuard, «PAMGuard,» [En línea]. Available: <https://www.pamguard.org/>.
- [11] J. F. Webb, R. R. Fay y A. N. Popper, «Fish Bioacoustics Vocal-Acoustic Communication: From Neurons to Behavior,» de *Handbook of Auditory Research*, 2008, pp. 253-278.

- [12] L. Casaretto, M. Picciulin y A. Hawkins, «Seasonal patterns and individual differences in the calls of male haddock *Melanogrammus aeglefinus*,» *Journal of Fish Biology*, vol. 87, nº 3, pp. 579-603, 2015.
- [13] A. H. Bass, B. P. Chagnaud y N. Y. Feng, «Comparative Neurobiology of Sound Production in Fishes,» de *Sound Communication in Fishes*, Springer, 2015, pp. 35-76.
- [14] «Acoustic Signalling in Female Fish,» de *Sound Communication in Fishes*, Springer, 2015, pp. 149-174.
- [15] M. Vieira, B. P. Pereira, P. Pousão-Ferreira, P. J. Fonseca y M. C. P. Amorim, «Seasonal Variation of Captive Meagre Acoustic Signalling: A Manual and Automatic Recognition Approach,» *Fishes*, vol. 4, nº 28, pp. 1-19, 2019.
- [16] W. W. Au, «The acoustics of the snapping shrimp *Synalpheus parneomeris* in Kanehōne Bay,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 103, nº 1, pp. 41-47, 1998.
- [17] D. R. Bohnenstiehl y A. L. D. B. Eggleston, «The Curious Acoustic Behavior of Estuarine Snapping Shrimp: Temporal Patterns of Snapping Shrimp Sound in Sub-Tidal Oyster Reef Habitat,» *PLoS ONE*, vol. 11, nº 1, p. 21, 2016.
- [18] L. Coquereau, J. Grall, L. Chauvaud, C. Gervaise, J. Clavier, A. Jolivet y L. D. Iorio, «Sound Production and associated behaviours of benthic invertebrates from a coastal habitat in the north-east Atlantic,» *Marine Biology*, vol. 163, nº 127, p. 13, 2016.
- [19] R. L. Putland, R. Constantine y C. A. Radford, «Exploring spatial and temporal trends in the soundscape of an ecologically significant embayment,» *Scientific Reports*, vol. 7, nº 5713, p. 12, 2017.
- [20] H. Medwin y M. M. Beaky, «Bubble sources of the Knudsen sea noise spectra,» *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 86, nº 3, pp. 1124-1130, 1989.
- [21] X. Han, J. Yin y Y. Yang, «Under-ice ambient noise in the Arctic Ocean: observations at the long-term ice station,» *Acta Oceanology Sinica*, vol. 39, nº 9, pp. 125-132, 2020.
- [22] C. S. Kent, R. D. McCauley, A. uncan, C. Erbe, A. Gavrilov, K. Lucke y I. Parnum, «Underwater Sound and Vibration from Offshore Petroleum Activities and their Potential Effects on Marine Fauna: An,» Centre for Marine Science and Technology (CMST), Curtin University, Perth, 2015.
- [23] G. M. Wenz, «Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources,» *The journal of the Acoustical Society of America*, vol. 34, nº 12, pp. 1936-56, 1962.
- [24] E. Moya de Rivas, F. J. Rodrigo Saura y S. G. Antonio., «Análisis de la contaminación de origen acústico y no acústico en entornos marinos,» de *Tecniacústica*, Cádiz, 2018.
- [25] E. Comission, «Environment,» [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor-11/index_en.htm#:~:text=Underwater%20Noise,-%E2%80%9CIntroduction%20of%20energy&text=The%20Marine%20Strategy%20Framework%20Directive%20identifies%20anthropogenic%20inputs%20of%20. [Último acceso: 2022].
- [26] SAES, «SAES,» [En línea]. Available: [https://electronica-submarina.es/medicion-submarina/mirs-medida-de-firmas-multi-influencia-para-buques-de-superficie-y-submarinos/.](https://electronica-submarina.es/medicion-submarina/mirs-medida-de-firmas-multi-influencia-para-buques-de-superficie-y-submarinos/) [Último acceso: 03 04 2022].
- [27] P. Cervantes y F. J. Rodrigo, «Substrate vibroscape of a high ship traffic density area,» de *EMSO Time Series Conferece: Observing Ocean Sound*, Las Palmas de Gran Canaria, 2021.
- [28] L. S. Wang, K. D. Heaney, T. Pangerc, P. D. Theobald, S. Robinson y M. Ainslie, «Review of underwater acoustic propagation models,» NPL, 2014.
- [29] D. Ross, *Mechanics of Underwater Noise*, New York: Pergamon, 1976.
- [30] M. F. McKenna, D. Ross, S. M. Wiggins y J. A. Hildebrand, «Underwater radiated noise from modern commercial ships,» *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, nº 1, pp. 92-103, 2011.
- [31] C. Audoly, C. Rousset y T. Leissing, «AQUUO Project - Modelling of ships as noise source for use in an underwater noise footprint assessment tool,» de *Inter-noise*, Melbourne, 2014.
- [32] S. Wales y H. R.M., «An ensemble source spectra model for mecharnt ship-radiated noise,» *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 111, nº 3, pp. 1211-1231, 2002.
- [33] J. E. Breeding, L. A. Pflug, M. Bradley, M. Hebert y M. Wooten, «RANDI 3.1 User's Guide,» Naval Research Laboratory, 1994.
- [34] A. M. Tashmukhambetov, G. E. Ioup, a. J. W. Ioup, N. A. Sidorovskaia y J. J. Newcomb, «Three-dimensional seismic array characterization study,» *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 123, nº 6, pp. 4094-4108, 2008.
- [35] P. v. d. Sman, «Seismic Source Modelling Report,» Irish Offshore Operators Association, Dublin, 2020.
- [36] A. Tsouvalas y A. Metrikine, «A three-dimensional vibroacoustic model for the

- prediction of underwater noise offshore pile driving,» *Journal of Sound and Vibration*, vol. 333, n° 8, pp. 2283-2311, 2014.
- [37] T. Lippert, M. A. Ainslie y O. v. Estorff, «Pile driving acoustics made simple: Damped cylindrical spreading model,» *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 143, n° 1, pp. 310-317, 2018.
- [38] Y. Peng, A. Tsouvalas, T. Stampoultzoglou y A. Metrikine, «A fast computational model for near- and far-field noise prediction due to offshore pile driving,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 149, n° 3, pp. 1772-1790, 2021.
- [39] S. Lippert, M. Nijhof, T. Lippert, D. Wilkes, A. Gavrilov, K. Heitmann, M. Ruhnau, O. von Estorff, A. Sch€afke, I. Sch€afer, J. Ehrlich, A. MacGillivray, J. Park, W. Seong, M. A. d. J. Ainslie, W. C., W. M., L. y P. Theobald, «COMPILE—A generic benchmark case for predictions of marine pile-driving noise,» *Journal of Oceanic Engineering*, vol. 41, n° 4, pp. 1061-1071, 2016.
- [40] J. M. Hovem, «Ray Trace Modeling of Underwater Sound Propagation,» de *Modeling and Measurement Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices*, 2013, pp. 573-598.
- [41] K. Mackenzie, «Nine-term equation for the sound speed in the oceans,» *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 103, n° 3, pp. 807-812, 1981.
- [42] G. Wong y S. Zhu, «Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature and pressure,» *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 97, n° 3, pp. 1732-1736, 1995.
- [43] M. A. Ainslie, «Effect of wind-generated bubbles on fixed range acoustic attenuation in shallow water at 1–4 kHz,» *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 118, n° 6, pp. 3513-3523, 2005.
- [44] B. C. Moore, *Introduction to the Psychology of Hearing*, Brill, 2013.
- [45] D. R. Ketten, «Cetacean Ears,» de *Hearing by Whales and Dolphins*, Springer, 2000.
- [46] C. Erbe, R. A. Dunlop y S. J. Dolman, «The Effects of Ship Noise on Marine Mammals—A Review,» de *Effects of Anthropogenic Noise on Animals*, Springer, 2018, pp. 277-309.
- [47] P. S. M. Hill, «How do animals use substrate-borne vibrations as an information source?,» *Naturwissenschaften*, vol. 96, pp. 1355-1371, 2009.
- [48] D. Ketten, J. Simmons, A. Hubbard y D. Mountain, «Dolphin and bat somar: convergence, divergence, or parallelism,» *Journa of the Acoustical Society of America*, vol. 115, n° 5, p. 2517, 2004.
- [49] D. Koopman, S. K. D. Budge y S. Iverson, «The topographical distribution of lipids inside the mandibular far bodies of odontocetes: remarkable complexity and consistency,» *Journal of Ocean Engineering*, vol. 31, pp. 95-106, 1996.
- [50] A. N. Popper y Darlene, «Underwater hearing,» de *The Senses: A Comprehensive Reference*, Eslevier Series, 2008, pp. 225-236.
- [51] D. Wartzok y D. Ketten, «Marine Mammal Sensory Systems,» de *Biology of marine Mammals*, Smithsonian Institution Press, 1999, pp. 117-175.
- [52] B. M. Casper y M. A. Babina, «Human Hearing in the Underwater Environment,» *Acoustics Today*, vol. 18, n° 1, pp. 23-31, 2022.
- [53] M. Al-Masri, A. Martin y J. Nedwell, «Underwater Hearing Thresholds And Proposed Noise Exposure Limits,» de *Subtech*, London, 1993.
- [54] C. Reichmuth y B. Southall, «Underwater hearing in California sea lions (*Zalophus californianus*): Expansion and interpretation of existing data,» *Marine Mammal Science*, vol. 28, n° 2, pp. 358-363, 2011.
- [55] C. Johnson, «Sound detection thresholds in marine mammals,» de *Marine Bio-Acoustics II*, Oxford, Pergamon Press, 1967, pp. 247-260.
- [56] J. J. Finneran y A. K. Jenkins, «Criteria and Thresholds for U.S. Navy Acoustic and Explosive Effects Analysis,» SSC PACIFIC, 2012.
- [57] P. A.N., r. Fay, C. Platt y O. Sand, «Sound Detection Mechanisms and Capabilities of Teleost Fishes,» de *Sensory Processing in Aquatic Environments*, Springer, 2003, pp. 3-38.
- [58] L. Roberts y M. Elliot, «Good or bad vibrations? Impacts of anthropogenic vibration on the marine epibenthos,» *Science of the Total Environment*, vol. 595, pp. 255-268, 2017.
- [59] B. U. Budelmann, «Hearing in Nonarthrod invertebrates,» de *The Evolutionary Biology of Hearing*, New York, Springer-Verlag, 1992, pp. 141-155.
- [60] Y. ZHANG, F. SHI, J. SONG, X. ZHANG y S. YU, «Hearing characteristics of cephalopods: Modeling and environmental impact study,» *Integrative Zoology*, vol. 10, pp. 141-151, 2015.
- [61] R. A. Dunlop, M. J. Noad, R. D. McCauley, E. Kniest, D. Paton y D. H. Cato, «The behavioural response of humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) to a 20 cubic inch air gun,» *Aquatic Mammals*, vol. 41, n° 4, pp. 412-433, 2015.
- [62] C. Erbe, C. Reichmuth, K. C. Cunningham, K. Lucke y R. J. Dooling, «Communication masking

in marine mammals: A review and research strategy,» *Marine Pollution Bulletin*, vol. 103, pp. 15-38, 2016.

- [63] M. C. Liberman, «Noise-induced hearing loss: Permanent versus temporary threshold shifts,» de *The Effects of Noise on Aquatic Life II*, New York, Springer-Verlag, 2016, pp. 1-7.
- [64] T. A. Romano, M. J. Keogh, C. Kelly, P. Feng, L. Berk, C. E. Schlundt, D. A. Carder y J. J. Finneran, «Anthropogenic sound and marine mammal health: measures of the nervous and immune systems before and after intense sound exposure,» *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 61, n° 7, pp. 1124-1134, 2004.
- [65] R. J. Dooling, M. R. Leek y A. N. Popper, «Effects of noise on fishes: what we can learn from humans and birds.,» *Integrative zoology*, vol. 10, n° 1, pp. 29-37, 2015.
- [66] D. M. Hudson, J. S. Krumholz, D. L. Pochtar, N. C. Dickenson, G. Dosso, G. P. E. P. Baker y T. E. Moll, «Potential impacts from simulated vessel noise and sonar on commercially important invertebrates,» *PeerJ*, 2022.
- [67] M. Solé, M. Lenoir, M. Durfort, M. López-Bejar, A. Lombarte, M. v. d. Schaar y M. André, «Does exposure to noise from human activities compromise sensory information from cephalopod statocysts?,» de *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, vol. 95, 2013, pp. 160-181.