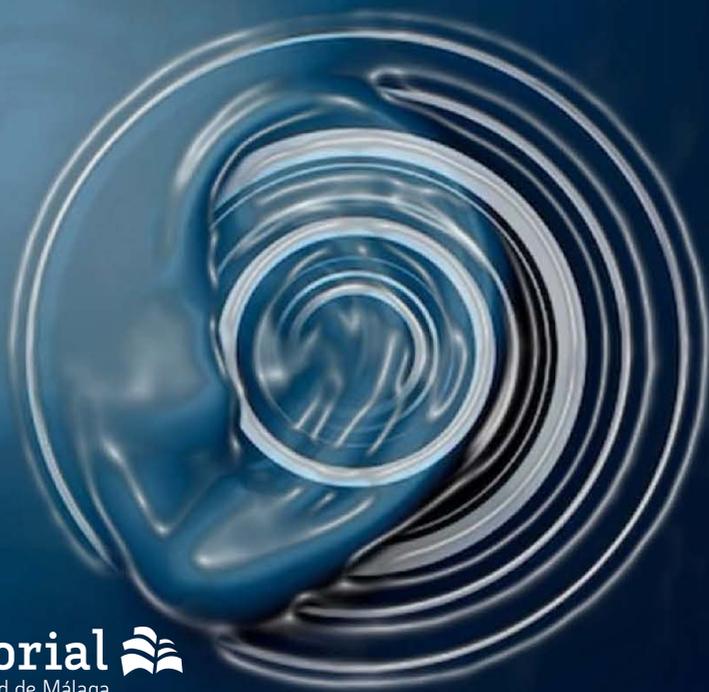


Conceptos Básicos de la Ciencia del Sonido en el Mar

María Campo Valera
Ignacio Rodríguez Rodríguez
José Víctor Rodríguez Rodríguez



Conceptos Básicos de la Ciencia del Sonido en el Mar

Julio de 2023

María Campo Valera
Ignacio Rodríguez Rodríguez
José Víctor Rodríguez Rodríguez

© UMA Editorial. Universidad de Málaga
Bulevar Louis Pasteur, 30 (Campus de Teatinos) - 29071 Málaga
www.umaeditorial.uma.es

© María Campo Valera, Ignacio Rodríguez Rodríguez, José Víctor Rodríguez Rodríguez

Diseño y maquetación: María Campo Valera, Ignacio Rodríguez Rodríguez, José Víctor Rodríguez Rodríguez

ISBN: 978-84-1335-266-4



Esta obra está sujeta a una licencia Creative Commons:
Reconocimiento - No comercial - SinObraDerivada (cc-by-nc-nd):
<http://creativecommons.org/licences/by-nc-nd/4.0/es>
Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización
pero con el reconocimiento y atribución de los autores.
No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar,
transformar o hacer obras derivadas.

*A mi papá, Benjamín Campo,
por inculcarme el amor por los libros*

El silencio busca al ruido por momentos. En poesía el silencio son los ojos entre líneas, la mirada entre palabras que buscan refugio. El ruido en poesía confunde al ritmo, pero finalmente con él marcha el mundo. Todo poeta debe ser sordo y cojo entre palabras y atreverse a bailar con los ojos cerrados. Todo poeta debe llevar su música por su cerebro. ¿Quieres un ejemplo? Imagina que estás desnuda en una pista de baile junto a un hombre y que tienes dos minutos para acercarte a él. ¿Quieres otro? Imagina que a punto de ser abandonado, cuando ella ha marchado, vuelve a sonar el timbre de la puerta y todavía tiembles. En ese momento el ruido recoge con naturalidad las ropas del suelo después de haberlo abrazado. En ese instante el silencio te marca el sonido reiterativo de tu corazón aguardando a escuchar su voz. El silencio se camufla de ruido y lo que aparenta descanso cae rendido en una mirada que con los ojos cerrados buscará en las palabras el sentido de lo que se dice o lo que se escribe como si nos jugáramos la vida al intentarlo. El silencio toma la medida de las cosas y el ruido se convierte en tu aliado. ¿Quieres un último ejemplo? Imagina que estás sólo y que no tienes a nadie alrededor, ¿Qué es lo que escuchas? ¿Tienes miedo? La cabeza que no encuentra su música escucha su rechazo en un íntimo recelo.

Kepa Murua

Índice general

Índice general	9
Índice de figuras	11
Índice de tablas	13
Introducción	15
1 El Sonido	17
1.1 ¿Qué es el sonido?	17
1.2 ¿Cómo se caracteriza el sonido?	19
1.3 ¿Cómo se producen los sonidos?	22
1.4 ¿Qué ocurre cuando las presiones sonoras son elevadas?	23
2 MOVIMIENTO SONORO	27
2.1 ¿A qué velocidad viaja el sonido?	27
2.2 ¿Por qué el sonido se debilita a medida que viaja?	30
2.3 ¿Cómo se desplaza el sonido?	32
2.4 ¿Cómo viaja el sonido a larga distancia? El Canal SOFAR	37
2.5 ¿Cómo se propaga el sonido del aire al agua?	47
3 ¿CÓMO SE MIDE EL SONIDO?	51
3.1 Los hidrófonos	52
3.2 ¿Qué unidades se utilizan para medir el sonido?	53
3.3 ¿Cómo se mide la audición?	55
3.4 ¿Qué sonidos pueden oír las personas?	57
4 LOS SONIDOS EN EL MAR	61
4.1 ¿Cuáles son los sonidos submarinos más comunes?	62
4.2 ¿En qué se diferencia el sonido en el aire del sonido en el agua?	66
4.3 ¿Cómo utilizan las personas y los animales el sonido en el mar?	69

4.4	¿Por qué los sonidos tienen determinadas propiedades?	73
5	TEMAS AVANZADOS SOBRE EL SONIDO	75
5.1	¿Qué es la intensidad?	75
5.2	Introducción a los decibeles	78
5.3	Introducción a la fase	79
5.4	Pérdidas básicas por transmisión	83
5.5	Errores de medición	86
	Bibliografía	91

Índice de figuras

1.1	Fotografía de una onda propagándose en la superficie del agua	18
1.2	Ilustración de onda transversal y longitudinal	19
1.3	Ilustración de una onda con diferentes amplitudes	20
1.4	Ilustración de una onda de alta y baja frecuencia	21
1.5	Ilustración de emisión del sonido	23
1.6	Fases de una onda sonora de gran amplitud que se propaga alejándose de una fuente	25
1.7	Fotografía de explosivos submarinos	25
1.8	Fotografía de cavitación en las hélices de un barco	26
2.1	Perfil de la velocidad del sonido en función de la temperatura, salinidad y presión	28
2.2	Perfil típico de la velocidad del sonido en el océano	29
2.3	Fotografía de una onda propagándose en un lago cuando se arroja una piedra .	31
2.4	Ilustración de una onda incidente y reflejada sobre una superficie	33
2.5	Fotografía de la refracción en un vaso de agua cuando se introduce una pajita	34
2.6	Ilustración de refracción	35
2.7	Ilustración de un ejemplo de reverberación entre la superficie y el fondo marino	38
2.8	Canal SOFAR	38
2.9	Perfil de la velocidad del sonido y su trayectoria a través de la columna de agua	42
2.10	Zona de convergencia	44
2.11	Perfiles anuales de la velocidad media del sonido en el Océano Pacífico	45
2.12	Perfiles de la velocidad del sonido en zona templada y polar, y diagramas de rayos para fuentes en el eje	46
2.13	Ilustración de cómo se propaga el sonido cuando viaja de un medio a otro . .	48
2.14	Ilustración de una onda propagándose en la frontera aire-agua	49
3.1	Fotografía de hidrófonos comerciales	52
3.2	Fotografía de una audiometría	56
3.3	Curva audiométrica que muestra la gama de sonidos que las personas pueden oír	57
3.4	Curva de audición humana	58
3.5	Curvas de igual intensidad	59

4.1	Gráfica de Wenz	63
4.2	Gráfica de niveles sonoros comunes en el aire	69
4.3	Ilustración de una ecosonda emitiendo y recibiendo señal acústica	70
4.4	Fotografía de un delfin utilizando la ecolocalización	72
5.1	Ilustración de una onda plana	77
5.2	Ejemplo de diferencia de fase entre dos ondas de sonido de la misma frecuencia	80
5.3	Ejemplo de interferencia constructiva de una onda	80
5.4	Ejemplo de interferencia destructiva de una onda	81
5.5	Onda sinusoidal	82
5.6	Ilustración de dispersión esférica	84
5.7	Ilustración de dispersión cilíndrica	86
5.8	Histograma de la velocidad del sonido	87

Índice de tablas

1.1	Características percibidas y físicas del sonido	19
1.2	Longitudes de onda a diferentes frecuencias	22
4.1	Niveles de fuentes sonoras de algunos mamíferos marinos	66
4.2	Niveles de fuentes sonoras generadas por actividades humanas	67
5.1	Valores de una onda sinusoidal en función del tiempo durante un ciclo completo	82

INTRODUCCIÓN

El sonido es una fuerza poderosa que envuelve nuestro mundo y desempeña un papel fundamental en la comprensión y exploración del entorno que nos rodea. En ningún lugar esta verdad es más evidente que en el vasto y misterioso océano, donde las ondas acústicas viajan y se propagan a través de un medio distinto al del aire, que presenta características únicas y desafíos particulares.

Este libro está diseñado para proporcionar una introducción clara y accesible a los conceptos básicos de la ciencia del sonido en el mar sin pretender ser un tratado exhaustivo sobre el tema, y está enfocado a todas las personas que tengan el deseo de sumergirse en este fascinante mundo, así como a estudiantes e ingenieros. A lo largo de sus páginas, se exploran principios científicos fundamentales y se presentan ejemplos y aplicaciones prácticas para ilustrar los conceptos comentados. Al comprender los principios de la ciencia del sonido en el mar, los lectores entenderán la importancia y las complejidades del sonido en el océano y cómo se utiliza esta ciencia en diversas disciplinas; que va desde la exploración hasta la conservación de la vida marina, las comunicaciones submarinas, entre otros.

Al finalizar este viaje, esperamos que los lectores se sientan capacitados para explorar aún más este emocionante campo y tomen conciencia de su relevancia en el mundo marino.

Con todo, este libro está conformado por cinco capítulos: En el Capítulo 1, exploraremos los aspectos fundamentales del sonido como onda acústica. En el Capítulo 2, nos adentraremos en el fascinante viaje del sonido a través del océano. El Capítulo 3, nos sumergirá en el mundo de las mediciones acústicas submarinas. El Capítulo 4, tratará los diversos sonidos submarinos que llenan el océano. Por último, el Capítulo 5, nos adentrará en conceptos más complejos pero igualmente interesantes.

¡Prepárate para sumergirte en el apasionante mundo del sonido en el mar!

1. EL SONIDO

En este primer capítulo se exploran los aspectos fundamentales y conceptos básicos del sonido como onda acústica. En este sentido, en la sección 1.1, es fundamental comprender cómo se clasifican las ondas acústicas, ya que existen diferentes tipos según su dirección de propagación. Además, en la sección 1.2, estudiaremos cómo se caracteriza el sonido, centrándonos en su amplitud e intensidad, la frecuencia y longitud de onda. En la sección 1.3, indagaremos en cómo se producen los sonidos; por ejemplo, por la vibración de objetos, ya sean cuerdas o membranas. Por último, en la sección 1.4, investigaremos qué sucede cuando las presiones sonoras son elevadas, y exploraremos fenómenos como la distorsión armónica, las ondas de choque y la cavitación. Con todo lo anterior, comprender los fundamentos del sonido le permitirá al lector aclarar estos conceptos tan usados en la vida cotidiana, así como sentar las bases para entender otros conceptos más profundos de la ciencia del sonido.

1.1. ¿QUÉ ES EL SONIDO?

El sonido se produce por la vibración o perturbación mecánica de un cuerpo y transmite dichas vibraciones a un medio circundante [1]. El tren continuo de las perturbaciones resultantes que se propaga con una velocidad dependiente de las propiedades del medio, se denomina *onda*. Por lo tanto, una onda acústica requiere un soporte de material elástico para propagarse, por ejemplo, un líquido (como el agua), un sólido (como el fondo marino) o un gas (como el aire). Las propiedades mecánicas de este medio de soporte dictan la velocidad de propagación, y a diferencia de las ondas electromagnéticas, el sonido no puede propagarse en

el vacío. Un ejemplo de propagación del sonido en un medio, se observa en la figura 1.1.



Figura 1.1: Fotografía de una onda propagándose en la superficie del agua. (Fuente: pixabay.com)

Así pues, una onda sirve como método de transporte de energía de un punto a otro del espacio. En resumen, las ondas mecánicas necesitan de:

- Algún tipo de **perturbación**.
- Un **medio** para propagarse la perturbación.
- **Partículas** que se puedan influenciar entre ellas.

1.1.1. Clasificación de las ondas acústicas

Las ondas acústicas se clasifican en ondas transversales y ondas longitudinales [2, 3], un ejemplo de ello se observa en la figura 1.2. A continuación, se describen brevemente.

- Ondas transversales: Perturbación¹ de las partículas perpendiculares a la dirección de propagación. Ej.: luz, ondulaciones en una cuerda.
- Ondas longitudinales: Perturbación de las partículas en la misma dirección que la de propagación (partículas que se mueven hacia atrás y hacia adelante). Compresión y rarefacción del sonido.

¹Perturbación: Vibración respecto a un punto de equilibrio (no hay transporte de materia).

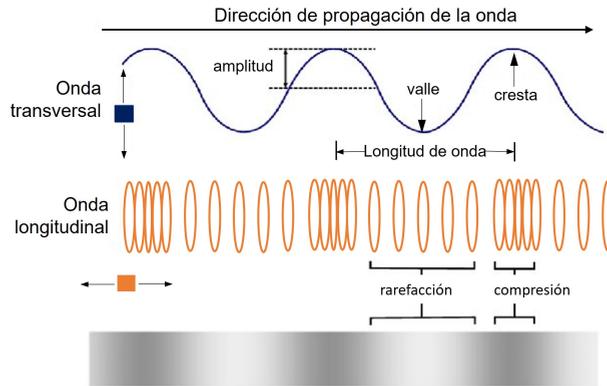


Figura 1.2: Ilustración de onda transversal y longitudinal. (Elaboración propia)

1.2. ¿CÓMO SE CARACTERIZA EL SONIDO?

En general, los sonidos suelen describirse como fuertes o suaves, agudos o graves. Estas palabras suelen utilizarse para caracterizar cómo se perciben los sonidos. Técnicamente, los sonidos se describen con características físicas tales como la amplitud y la frecuencia. Los científicos miden la amplitud, que se relaciona con las palabras comunes que describen la percepción del sonido: fuerte y suave. También miden la frecuencia, que puede relacionarse con la palabra común que describe la percepción del sonido: tono. En la siguiente tabla 1.1 se resume lo comentado.

Tabla 1.1: Características percibidas y físicas del sonido

Características percibidas	Características físicas
Volumen (fuerte o suave)	Intensidad (amplitud)
Tono	Frecuencia

Otras de las características utilizadas para describir una onda sonora es la longitud de onda y la fase. Estos conceptos se describen a continuación, para tener una mejor comprensión de cada uno de ellos.

1.2.1. Amplitud e intensidad

La amplitud de una onda sonora se refiere al cambio de presión provocado por la onda medida en un lugar determinado [4]. El sonido se percibe más fuerte si la amplitud aumenta y más suave si disminuye. Un ejemplo se ilustra en la figura 1.3.

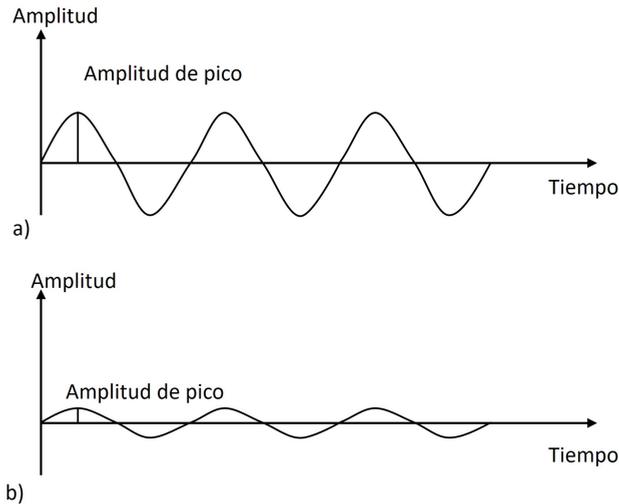


Figura 1.3: Ilustración de una onda con diferentes amplitudes. (Elaboración propia)

A su vez, la amplitud está relacionada con la cantidad de energía que transporta la onda. Una onda de gran amplitud transporta una gran cantidad de energía, mientras que una onda de baja amplitud transporta una pequeña cantidad de energía.

Es importante resaltarle al lector, que la amplitud y la intensidad están relacionadas, pero no son lo mismo. La intensidad de una onda sonora se define como la energía transmitida a través de una unidad de área, por unidad de tiempo, en la dirección en la que viaja la onda sonora [1]; es una cantidad vectorial que tiene magnitud y dirección. La energía de una onda sonora se compone tanto de la componente de presión como de la componente de velocidad de las partículas. Los sonidos de mayor intensidad se perciben como más fuertes. Por otro lado, las intensidades sonoras relativas suelen expresarse en unidades denominadas decibeles dB, (para ampliar este concepto, ver la sección 5.2).

En este sentido, la onda acústica se caracteriza por la amplitud del “movimiento local” de cada partícula en el medio de propagación, alrededor de su posición de equilibrio, por la correspondiente velocidad de las partículas (que no debe confundirse con la velocidad de propagación de la onda), y por la presión acústica resultante.

1.2.2. Frecuencia

Los tonos agudos o graves se refieren a la frecuencia de una onda sonora. Como el sonido viaja en forma de onda, las características que los científicos utilizan para describir el sonido, como la frecuencia, pueden relacionarse con la imagen de una onda, como se observa en la figura 1.4. En esta figura la onda tiene un patrón repetitivo, entonces una repetición completa se denomina ciclo, y el tiempo necesario para completar un ciclo es el periodo T [5]. Por lo tanto, la frecuencia f es el número de ciclos por segundo.

La unidad utilizada para medir la frecuencia es el hercio Hz, que se define como el número de ciclos en un segundo. (La unidad hercio debe su nombre a Heinrich Hertz, un famoso físico del siglo XIX).

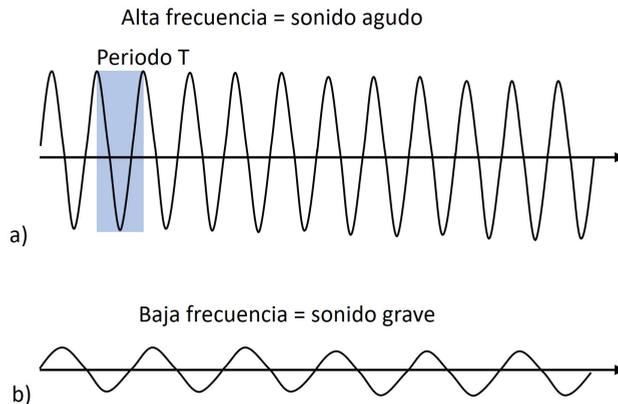


Figura 1.4: Ilustración de una onda de alta y baja frecuencia. (Elaboración propia)

1.2.3. Longitud de onda

Es la distancia que recorre una onda sonora en un periodo T . La longitud de onda λ . está relacionada con la velocidad a la que viaja el sonido en el medio y puede calcularse dividiendo la velocidad del sonido c por la frecuencia del sonido f :

$$\lambda = c \cdot t = c/f \quad (1.1)$$

Un sonido de alta frecuencia tiene una longitud de onda más corta que un sonido de baja frecuencia. Utilizando 1500 m/s para la velocidad aproximada del sonido en el agua de mar, se tienen en la tabla 1.2 las siguientes relaciones entre frecuencia y longitud de onda calculadas, utilizando la Ecuación 1.1:

Tabla 1.2: Longitudes de onda a diferentes frecuencias

Frecuencia (Hz)	Longitud de onda (λ)
100	15
1000	1.5
10000	0.15

1.3. ¿CÓMO SE PRODUCEN LOS SONIDOS?

Anteriormente, se comentó que el sonido se produce por la vibración o perturbación de un objeto. Por ejemplo, cuando se golpea un tambor, la piel o membrana del tambor vibra, como se muestra en la figura 1.5. La compresión y rarefacción (expansión) del aire a ambos lados de la membrana vibrante produce diferencias en la presión del aire, estas diferencias generan una onda sonora que se propaga hacia el exterior desde la superficie del tambor [6, 7].

La frecuencia producida por una fuente sonora vibrante está relacionada con su tamaño. Por ejemplo, un tambor grande genera sonidos de menor frecuencia que otros más pequeños.

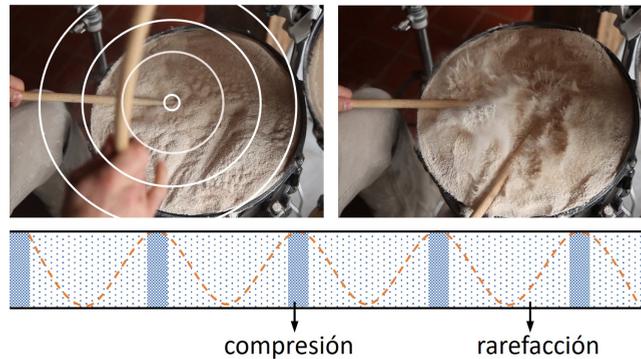


Figura 1.5: Ilustración de emisión del sonido. Las partículas del tambor ayudan a ver la vibración de la membrana del tambor. (Fuente: pixabay.com, modificada por los autores)

1.4. ¿QUÉ OCURRE CUANDO LAS PRESIONES SONORAS SON ELEVADAS?

Las fuentes generadoras de sonido, como los cañones de aire, los explosivos y los sistemas de chispas eléctricas, pueden crear grandes presiones sonoras bajo el agua. En estos casos, las descripciones simples de las ondas sonoras en términos de la frecuencia, longitud de onda y amplitud ya no son adecuadas. Pueden producirse otros fenómenos, como la distorsión armónica, las ondas de choque y la cavitación [8-11].

Una descripción de estos términos ayudará a entender mejor estos fenómenos físicos. A continuación, se describen.

1.4.1. Distorsión armónica

La forma de una onda sonora de gran amplitud como en la figura 1.6a se distorsiona a medida que se desplaza por el agua, porque a amplitudes elevadas, la velocidad del sonido es función de la magnitud de la presión asociada a la onda. Esto se suma a la presión hidrostática que se utiliza para calcular la velocidad del sonido en el caso de las ondas sonoras de menor amplitud [12]. La presión acústica es mayor durante la fase de compresión de la onda sonora y, por tanto, el sonido viaja más rápido. Por el contrario, la presión sonora en el medio es menor durante la fase de rarefacción de la onda sonora, y el sonido viaja más despacio. Como

resultado, la onda se distorsiona, como se muestra en la figura 1.6b. Las ondas distorsionadas contienen energía no solo a la frecuencia de la onda sonora original (frecuencia fundamental), sino también al doble de la frecuencia original (segundo armónico), al triple de la frecuencia original (tercer armónico), y así sucesivamente. Este comportamiento se denomina *distorsión armónica* [13]. La transferencia de energía de la frecuencia fundamental a los armónicos limita la cantidad de energía que una fuente sonora puede transmitir al océano.

Si la amplitud es lo suficientemente alta, la onda sonora acaba adoptando una forma de diente de sierra a medida que se propaga alejándose de la fuente, con aumentos casi instantáneos de la presión u ondas de choque que se producen una vez por ciclo de la onda sonora original, como se observa en la figura 1.6c. Sin embargo, las frecuencias más altas se absorben más rápidamente en el agua de mar, por lo que la forma de onda en diente de sierra volverá a convertirse en una onda sonora simple y más débil a mayores distancias de la fuente, como se muestra en la figura 1.6d y figura 1.6e [13, 14].

1.4.2. Ondas de choque

Las ondas de choque pueden generarse por distorsión armónica de ondas sonoras de gran amplitud [15], como se ha descrito anteriormente. Las explosiones submarinas también generan ondas de choque. Por lo que una explosión submarina de un material como el TNT (trinitrotolueno) comienza con una reacción química extremadamente rápida que crea gases calientes a temperaturas de unos 3000°C y presiones de unas 50000 atmósferas. La presión en la interfase gas-agua hace que el agua se desplace hacia el exterior a velocidades superiores a la del sonido en el agua de mar, creando una onda de choque [16]. La onda de choque generada por una explosión química submarina consiste en un aumento casi instantáneo de la presión, que luego decae rápidamente. Esta se propaga a velocidades superiores a la velocidad habitual del sonido en el agua de mar, que es 1500 m/s. Los gases calientes también crean una gran burbuja de gas oscilante, a menos que la explosión se produzca tan cerca de la superficie, que los gases de la burbuja salgan a la atmósfera.

Los explosivos se utilizan para muchos fines, como la exploración y explotación submarina de petróleo y gas, (ver figura 1.7), la construcción y demolición submarina, la investigación de la propagación del sonido, la investigación geológica y fines militares. Además de materiales explosivos como el TNT, existen sistemas similares a los explosivos, como las pistolas de aire comprimido y los sistemas de chispa eléctrica, que también generan ondas de choque.

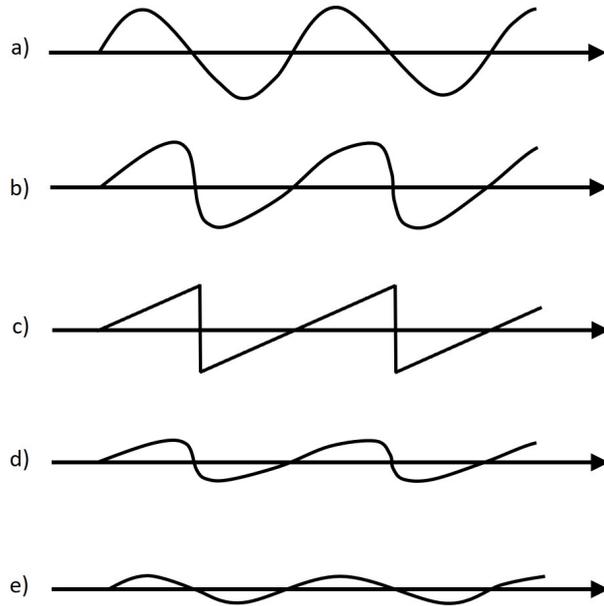


Figura 1.6: Fases de una onda sonora de gran amplitud que se propaga alejándose de una fuente. (a) Señal de presión cerca de una fuente intensa. (b) Señal distorsionada tras la propagación a lo largo de la fuente. (c) Onda de choque (onda en diente de sierra) alejándose de la fuente. (d) Atenuación de la onda de choque tras la pérdida de los componentes de alta frecuencia. (e) Pequeña amplitud de la onda de choque anterior. (Elaboración propia, adaptado de [14])



Figura 1.7: Fotografía de explosivos submarinos. (Fuente: microservicios.com)

1.4.3. Cavitación

Cuando la presión sonora en la fase de baja presión de la onda es lo suficientemente baja, el medio a través del cual viaja el sonido se rompe o cavita. La baja presión pone en tensión el medio, generando burbujas. Las burbujas producen sonido cuando se colapsan. También absorben la energía sonora que se propaga a través de ellas. El valor exacto al que se rompe el medio depende de la frecuencia, la duración y las repeticiones de los impulsos sonoros. El efecto de una mayor profundidad de la fuente es aumentar las presiones máximas necesarias para provocar la cavitación en la misma medida que la presión de fondo ambiental [15].

Las burbujas de cavitación también pueden producirse por la disminución de la presión en las puntas de las palas de las hélices submarinas de alta velocidad, como en la figura 1.8. Por otro lado, las hélices de los submarinos en profundidad pueden girar más rápido sin producir cavitación. Por lo tanto, los submarinos pueden ir rápido en profundidad sin hacer ruido.

La cavitación establece un límite importante en el nivel de las fuentes acústicas a poca profundidad. Cualquier intento de aumentar la presión acústica por encima de la presión ambiente generará una nube de burbujas que distorsionará la señal y, de hecho, disminuirá la presión acústica lejos de la fuente.

La cavitación acústica puede iniciar o aumentar la actividad química. Puede erosionar metales y plásticos, y lo que es más notable, puede producir luz (sonoluminiscencia) [17].



Figura 1.8: Fotografía de cavitación en las hélices de un barco. (Fuente: navegacioncostera.blogspot.com/la-cavitacion.html)

2. MOVIMIENTO SONORO

En este capítulo se presentan aquellas características que involucran el movimiento o la propagación de ondas de sonido a través de distintos medios, como el aire y el agua. En este sentido, es importante que el lector comprenda cómo viaja el sonido y por qué se debilita a medida que se aleja de su fuente original. Con esto en mente, en la sección 2.1, nos preguntamos a qué velocidad viaja el sonido, y descubriremos que esta velocidad varía según el medio en el que se propague. En la sección 2.2, explicaremos las razones por las cuales el sonido se debilita a medida que se aleja de la fuente, analizando los efectos de las pérdidas energéticas, la dispersión geométrica y la absorción acústica. En la sección 2.3, viajaremos junto al sonido, y destacaremos los procesos de la reflexión, refracción, dispersión y la reverberación. En la sección 2.4, estudiaremos el canal SOFAR, un fenómeno interesante que permite la propagación del sonido a larga distancia bajo el agua. Analizaremos su historia, la velocidad mínima del sonido, su propagación y la variabilidad que puede experimentar. Por último, en la sección 2.5, se aborda la interacción del sonido entre dos medios, como el aire y el agua.

2.1. ¿A QUÉ VELOCIDAD VIAJA EL SONIDO?

Se puede decir que el sonido viaja a unos 1500 m/s en el agua de mar y en el aire viaja mucho más despacio; a unos 340 m/s. Aun así, la velocidad del sonido en el agua de mar no es un valor constante. Varía en una pequeña cantidad (un pequeño porcentaje) de un lugar a otro, de una estación a otra, de la mañana a la noche y con la profundidad del agua. Aunque las variaciones en la velocidad del sonido

no son grandes, pueden ser significativas en ciertos contextos y deben tenerse en cuenta al estudiar su propagación en el océano [18, 19].

La velocidad del sonido se ve afectada por las variables oceanográficas de temperatura, salinidad y presión. Se puede observar el efecto de cada una de estas variables sobre la velocidad del sonido centrándonos en un punto del océano. Cuando los oceanógrafos observan el cambio de una variable oceanográfica con la profundidad del agua, lo denominan perfil [20]. En esta sección, se examinará el perfil de temperatura, el perfil de salinidad y el perfil de presión. Al igual que el perfil de la cara de una persona da una vista lateral de su rostro, un perfil oceanográfico brinda una vista lateral del océano en ese lugar de arriba a abajo. En la figura 2.1, se puede observar cómo cambian las características del océano a medida que se desciende desde la superficie del mar hasta el fondo marino.

La figura 2.1 muestra los perfiles básicos de un lugar situado en las profundidades del océano abierto, aproximadamente a medio camino entre el ecuador y el polo norte o sur. En estos perfiles, la temperatura disminuye a mayor profundidad del agua, mientras que la salinidad y la presión aumentan. En este sentido, se hace referencia a la presión oceánica debida al peso del agua suprayacente (presión de equilibrio), no a la presión asociada a una onda sonora, la cual es mucho menor. En general, y respecto a la profundidad, la temperatura suele disminuir, la salinidad puede aumentar o disminuir y la presión siempre aumenta [21].

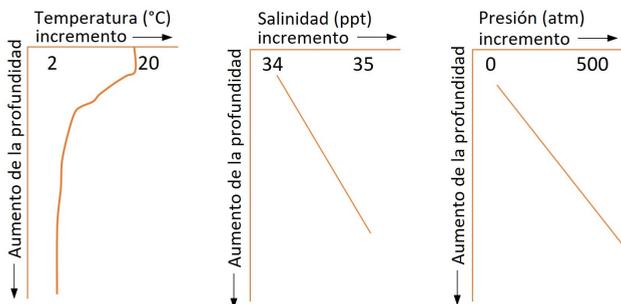


Figura 2.1: Perfil de la velocidad del sonido en función de la temperatura, salinidad y presión. (Elaboración propia)

En función de estos perfiles se desprende que la temperatura puede llegar a cambiar considerablemente, disminuyendo desde 20 grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) cerca de la superficie en latitudes medias, hasta alcanzar los 2 grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) cerca del fondo del océano. Por otro lado, la salinidad cambia solo ligeramente, de 34 a 35

Unidades Prácticas de Salinidad, PSU¹, aproximadamente de 34 a 35 partes por mil (ppt) (ver unidades de salinidad en sección 3.2). Por último, la presión también aumenta, desde 0 en la superficie hasta 500 atmósferas (atm) en el fondo.

La velocidad del sonido en el agua aumenta con el aumento de la temperatura del agua, el aumento de la salinidad y el aumento de la presión (profundidad) [22]. El cambio aproximado en la velocidad del sonido con un cambio en cada propiedad es el siguiente:

Temperatura 1°C = 4,0 m/s

Salinidad 1 PSU = 1,4 m/s

Profundidad (presión) 1 km = 17 m/s

La figura 2.2, muestra un perfil típico de la velocidad del sonido en las profundidades del océano abierto en latitudes medias.

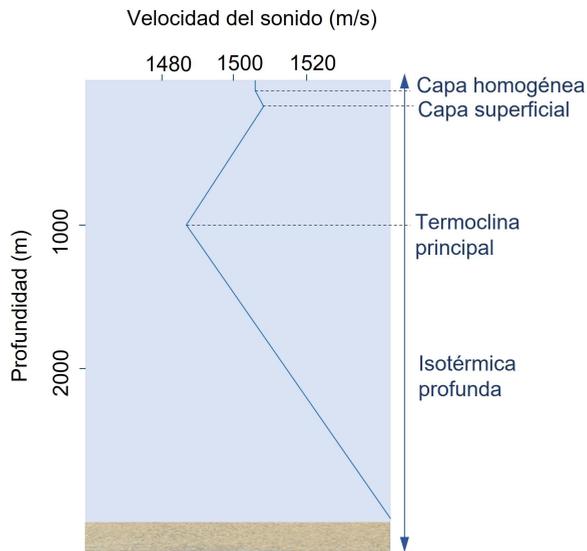


Figura 2.2: Perfil típico de la velocidad del sonido en el océano. (Elaboración propia)

La velocidad del sonido en la superficie es menor porque la temperatura es alta debido a que el sol calienta las capas superiores del océano. A medida que aumenta la profundidad, la temperatura se va enfriando hasta alcanzar un valor casi

¹PSU: Del inglés, Practical Salinity Unit.

constante. Dado que la temperatura se mantiene constante, la presión del agua es el factor que más influye en la velocidad del sonido. Debido a que la presión aumenta con la profundidad, la velocidad del sonido también aumenta [23]. En la mayoría de los lugares del océano, la salinidad tiene un efecto mucho menor en la velocidad del sonido en comparación con la temperatura o la presión. Esto se debe a que los cambios de salinidad en alta mar son pequeños. Sin embargo, cerca de la costa y en los estuarios, donde la salinidad varía considerablemente, esta puede tener un efecto más significativo en la velocidad del sonido en el agua.

Es importante comprender que la forma en la que viaja el sonido depende en gran medida de las condiciones del océano. El mínimo de velocidad del sonido a unos 1000 m de profundidad en latitudes medias, crea un canal sonoro que permite que el sonido viaje largas distancias en el océano. La sección 2.4 Canal de SO-FAR, proporciona más información sobre cómo el mínimo de velocidad del sonido concentra las ondas sonoras en el canal.

2.2. ¿POR QUÉ EL SONIDO SE DEBILITA A MEDIDA QUE VIAJA?

Efectos del volumen del agua: Pérdidas energéticas

Como seguramente el lector habrá experimentado en su vida cotidiana, cuando se lanza una piedra a un estanque y se observa desde un costado, se puede notar que las ondas se hacen más pequeñas a medida que se alejan del punto donde cayó la piedra. Esto se muestra en la figura 2.3. Cuando las ondas acústicas se propagan, el proceso más notorio es la pérdida de intensidad o atenuación de la señal, causada por la *absorción* de la energía acústica por parte del medio de propagación y por la *dispersión geométrica*. Estas pérdidas por transmisión TL^2 , son un parámetro clave para los sistemas acústicos, ya que limita la amplitud de la señal recibida.

2.2.1. Dispersión geométrica

Cuando una onda acústica se propaga a través de un medio, su energía transmitida se extiende sobre una superficie cada vez más grande [1, 24]. A medida que el área total de la superficie de la onda acústica aumenta con la distancia, la energía se distribuye en esta área y, por lo tanto, la intensidad de la onda disminuye. La intensidad de una onda acústica se define como la potencia acústica transferida por una fuente por unidad de área (ver sección 5.1). En un medio ideal, es decir, sin

²TL: Del inglés, Transmission Loss.



Figura 2.3: Fotografía de una onda propagándose en un lago cuando se arroja una piedra. (Fuente: pixabay.com)

reflexiones, homogéneo e isotrópico, la propagación de la onda acústica presenta una *dispersión esférica*, que generalmente se asume para el mar en aguas profundas. Sin embargo, en medios no homogéneos, como el agua de mar poco profunda, la propagación sigue una *dispersión cilíndrica*. Estos conceptos se abordan en la sección 5.4.

2.2.2. Absorción acústica

Cuando el sonido viaja a través de un medio como el agua, este es absorbido por las moléculas del medio. De hecho, el medio transforma parte de la energía acústica de la onda sonora en calor [25, 26]. Antes de que llegue la onda sonora, las moléculas del medio están en reposo y, para que empiecen a vibrar, el sonido debe tener la suficiente potencia para vencer la resistencia al movimiento de las moléculas. Es decir, las moléculas deben superar la viscosidad del medio a través del cual se propaga el sonido. En ese proceso, absorben parte de la energía de la onda sonora [27, 28]. La absorción en el agua de mar es mucho mayor de lo que se esperaría solo debido a la viscosidad del agua pura. Además de la absorción causada por la viscosidad, algunas de las sustancias químicas que hacen que el océano sea salado también absorben el sonido y lo convierten en calor. Como resultado, a medida que el sonido se propaga a través de un medio, su amplitud disminuye más rápidamente de lo que lo haría solo debido a la pérdida por propagación. Esto se debe a la pérdida de energía acústica en forma de calor.

La cantidad de absorción depende de la frecuencia del sonido. Un sonido de alta frecuencia tiene muchos ciclos en un segundo, lo que hace que las partículas

del medio vibren rápidamente. Similar a cuando las personas se frotan las manos rápidamente, esto produce más calor que, por el contrario, frotarlas lentamente. Del mismo modo, las moléculas del medio que vibran rápidamente debido al sonido de alta frecuencia también generan calor a medida que absorben energía acústica. Por lo tanto, los sonidos de alta frecuencia tienden a sufrir una mayor absorción en comparación con los sonidos de baja frecuencia cuando se propagan a través del agua.

En resumen, la absorción acústica es el proceso en el cual el sonido es absorbido por las moléculas del medio y convertido en calor. La cantidad de absorción depende de la frecuencia del sonido y de las propiedades del medio a través del cual se propaga.

2.3. ¿CÓMO SE DESPLAZA EL SONIDO?

Cuando se enciende una linterna, el haz de luz se desplaza en línea recta en la dirección hacia la cual se apunta. En situaciones simples, el sonido también se propaga en línea recta. Sin embargo, en el océano, las interacciones entre el sonido y el agua hacen que la transmisión del sonido sea mucho más compleja. Estos efectos incluyen la reflexión, refracción y la dispersión. [18, 29].

Los siguientes subapartados proporcionan más información sobre cómo viaja el sonido en el océano.

2.3.1. Reflexión

Todos hemos experimentado el fenómeno de los ecos cuando nuestras voces se reflejan en grandes salas o túneles. Podemos afirmar que los ecos son el resultado de las reflexiones, ya que el sonido rebota en superficies como las paredes, el techo y el suelo de los túneles y vuelve a ser escuchado. Del mismo modo que un espejo refleja la luz, las superficies duras de las paredes reflejan el sonido.

Al mirar un espejo, se pueden ver imágenes de objetos sin tener que mirar directamente a esos objetos. Un ejemplo común es el espejo retrovisor de un automóvil, que permite a los conductores ver los objetos detrás de ellos sin tener que girar la cabeza. Esto es posible debido a que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, como se muestra en la figura 2.4.

El reflector puede ser cualquier límite entre dos medios que cambie la dirección de una onda entrante, como un espejo plano. La onda que se desplaza hacia el reflector

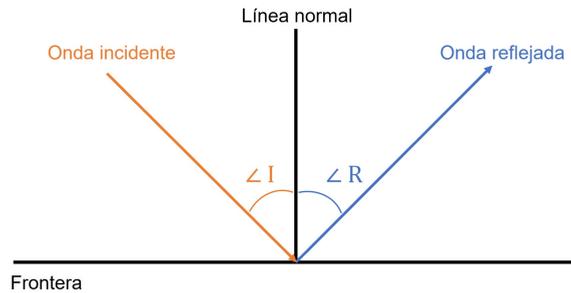


Figura 2.4: Ilustración de una onda incidente y reflejada sobre una superficie. (Elaboración propia)

se denomina onda incidente, y al chocar en ángulo con el reflector, su trayectoria se desvía formando el ángulo de la onda reflejada. Una línea perpendicular al reflector, conocida como línea normal, divide el ángulo entre la onda incidente y la reflejada en dos ángulos iguales. Esto se representa en la figura 2.4 como “ $\angle I$ ”, y el ángulo de reflexión como “ $\angle R$ ”.

Un espejo plano es un reflector casi perfecto para la luz, ya que la cantidad de energía de la onda reflejada es igual a la cantidad de energía de la onda incidente. La parte inferior de la superficie del océano es un reflector casi perfecto para el sonido en condiciones de calma, especialmente a bajas frecuencias. Cuando la onda incidente choca con otro tipo de límites, como el fondo marino, una parte de la energía acústica se refleja en el primer medio (el océano) y otra parte se transmite al segundo medio (el fondo marino) [17]. La cantidad de sonido que se refleja y se transmite depende de las propiedades acústicas de los dos medios y del ángulo de incidencia. Cuanto más similares sean las propiedades acústicas de los dos medios, menor será la reflexión y mayor será la transmisión [19]. Por el contrario, si los dos medios son menos similares, habrá una mayor reflexión y una menor transmisión. Por ejemplo, un lecho marino de roca dura actúa como un reflector más efectivo que la arena suelta. Por lo tanto, las ondas sonoras rebotarán con mayor intensidad en un lecho rocoso.

2.3.2. Refracción

Un ejemplo práctico de la refracción puede ser cuando se introduce una pajita dentro de un vaso con agua como se observa en la figura 2.5, aparentemente la pajita parece doblarse cuando entra al agua. Esto se llama refracción y sucede porque la luz se mueve más lentamente en el agua que en el aire.



Figura 2.5: Fotografía de la refracción en un vaso de agua cuando se introduce una pajita. (Elaboración propia)

Se puede observar cómo ocurre esto, por ejemplo, cuando una fila de personas se desplaza en un ángulo desde el pavimento hacia la arena. La fila se curva porque las personas en la arena se mueven más lentamente que las que siguen en el pavimento, como se muestra en la figura 2.6. Este efecto es similar al que hace que una pajita parezca doblarse.

El sonido se refracta de manera similar a la luz [14, 31]. La refracción ocurre no solo cuando la luz pasa del agua al aire, sino siempre que hay un cambio en la velocidad de la luz. De manera similar, una onda sonora que viaja a través del océano se refracta siempre que encuentra cambios en la velocidad del sonido. Dado que la velocidad del sonido varía debido a cambios en la temperatura, salinidad y presión, una onda sonora experimenta refracción a medida que se propaga por el océano.

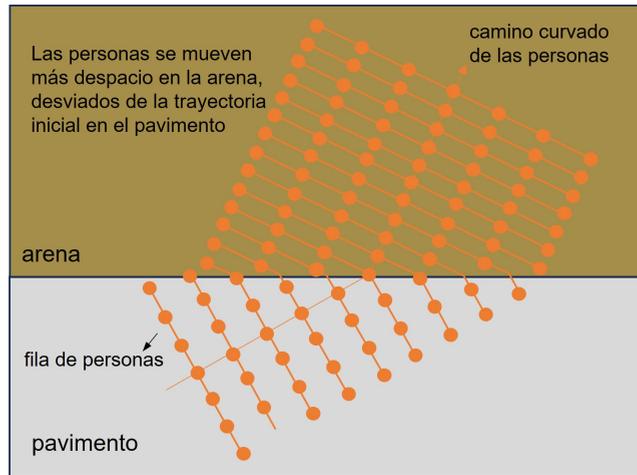


Figura 2.6: Ilustración de refracción. (Elaboración propia, adaptado de [30])

2.3.3. Dispersión

Cuando las ondas sonoras encuentran obstáculos con dimensiones muy pequeñas en comparación con sus longitudes de onda, se dispersan en todas las direcciones [24, 32].

La amplitud de las ondas dispersadas a larga distancia del obstáculo es directamente proporcional al tamaño del obstáculo e inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda. En consecuencia, un sonido con una longitud de onda grande tendrá efectos de dispersión pequeños, mientras que un sonido con una longitud de onda pequeña presentará una dispersión considerable.

2.3.4. Reverberación

El movimiento del sonido a través del agua puede verse complicado por las pérdidas energéticas, reflexión, refracción y dispersión. Todas ellas pueden afectar a la trayectoria y/o intensidad del sonido.

Las ondas sonoras que se mueven a través del agua pueden encontrar diferencias en las densidades y velocidades del sonido debido a numerosos objetos, inhomoge-

neidades y límites rugosos (fondo y superficie del mar). Estos dispersan la energía sonora en muchas direcciones [1].

La reverberación es la suma de todas las dispersiones sonoras que se reciben en un lugar específico, y normalmente se percibe como un sonido prolongado que disminuye lentamente, con varios picos más agudos causados por la retrodispersión de los objetos que dispersan el sonido de manera más intensa [33]. Muchos instrumentos acústicos buscan aprovechar el retorno directo de un objeto, como el eco o la retrodispersión. En el caso del sonar activo (ver subsección 4.3.1), la reverberación puede convertirse en un factor limitante para detectar la señal de eco, ya que puede ser más intensa que el propio eco de retorno y el ruido ambiental. Esto puede alterar las características de la señal original y tiende a persistir durante intervalos de tiempo mayores que la duración de la señal original.

A continuación, se describen los tipos de reverberación existentes.

Reverberación de volumen

Las partículas en suspensión y las inhomogeneidades del agua del océano provocan dispersión. Los dispersores pueden ser pequeños, como sedimentos en suspensión, burbujas o plancton, o más grandes, como peces o ballenas. En la mayoría de los entornos oceánicos, la vida marina es la principal fuente de reverberación del volumen. El grado de dispersión depende de la longitud de onda del sonido en relación con el tamaño de la partícula, la densidad de la partícula y la forma de la partícula [19]. Las inhomogeneidades son fluctuaciones de salinidad, densidad o temperatura que provocan dispersión. Pueden ser frentes oceánicos, remolinos o capas estratificadas del océano con un gradiente de densidad en el límite a escalas grandes o pequeñas.

La reverberación volumétrica suele disminuir al aumentar la profundidad del océano, ya que a mayor profundidad existen menos partículas y se reducen los gradientes de densidad y otras inhomogeneidades. Una excepción es la Capa de Dispersión Profunda DSL³, que es una capa concentrada de organismos marinos que crea una fuerte dispersión que a veces puede parecerse a la dispersión superficial.

³DSL: Del inglés, Deep Scattering Layer.

Reverberación de la superficie del mar

Una superficie marina rugosa puede actuar como un dispersor altamente efectivo pero también muy variable. Esta rugosidad puede abarcar escalas que van desde pequeñas ondulaciones milimétricas hasta grandes olas generadas por tormentas. La dispersión en la superficie del mar es compleja debido a la variabilidad del viento, las olas y la presencia de burbujas. Esta dispersión depende del ángulo de incidencia del sonido sobre la superficie del mar, la velocidad del viento, la longitud de onda y la presencia de burbujas, ver figura 2.7. En general, la dispersión es mayor cuando la longitud de onda es corta y la velocidad del viento es mayor [34].

En las regiones polares, el hielo marino puede causar niveles de reverberación hasta 40 dB más altos que en entornos sin hielo [19]. La rugosidad de la parte inferior del hielo es un factor importante que afecta a la reverberación.

Reverberación del fondo

La reverberación del fondo marino es otro tipo de reverberación de superficie, pero es más difícil de predecir en comparación con la reverberación de la superficie del mar. La reverberación del fondo depende de varios factores, como el ángulo de incidencia, la longitud de onda del sonido, la rugosidad de la superficie, el tipo de fondo marino (roca o sedimento, y composición), la estratificación del sedimento, el tamaño del grano y la distribución del tamaño del grano. La relación entre el tamaño del grano y la reverberación no está clara en muchos casos; la rugosidad de la superficie puede ser un mejor indicador de la intensidad de la dispersión. Cuando el tamaño de grano del fondo es representativo de la arena (0,0625 a 2 mm), los granos individuales pueden actuar como dispersores junto con la superficie en su conjunto en algunas frecuencias.

La comprensión de la reverberación del fondo marino puede verse complicada por factores adicionales, como la porosidad y la transmisión del sonido al fondo marino, así como la dispersión desde las capas de sedimentos superficiales [15, 17].

2.4. ¿CÓMO VIAJA EL SONIDO A LARGA DISTANCIA? EL CANAL SOFAR

En el océano existe un canal sonoro que permite que el sonido de baja frecuencia recorra grandes distancias [35]. Este canal se denomina SOund Fixing And Ranging, o SOFAR. Un ejemplo de este canal se presenta en la figura 2.8.

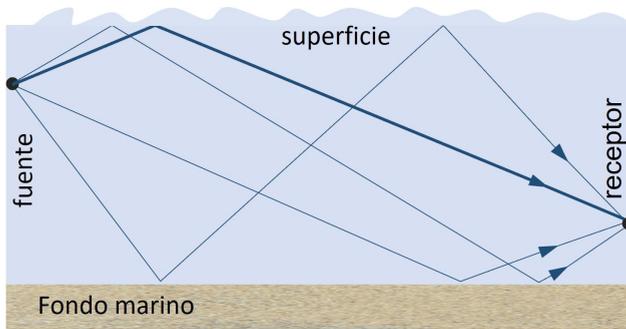


Figura 2.7: Ilustración de un ejemplo de reverberación entre la superficie y el fondo marino. La línea gruesa representa una reflexión estándar. Los rayos delgados indican una dispersión adicional o trayectorias de propagación causadas por la rugosidad de la superficie y el fondo marino. (Elaboración propia)

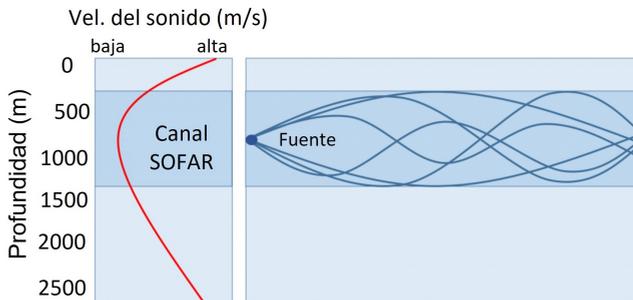


Figura 2.8: Canal SOFAR. A la izquierda, perfil de velocidad del sonido desde latitudes medias. A la derecha, se ilustran únicamente las trayectorias que sigue el sonido desde una fuente situada a 1000 m de profundidad hasta un receptor ubicado también a 1000 m de profundidad y a una distancia de 210 km de la fuente. (Fuente: <https://www.revistaejercitos.com>)

Las siguientes subsecciones incluyen información sobre cómo se descubrió y utilizó el canal SOFAR a lo largo de los años, cómo se forma, cómo viaja el sonido en él y cómo varía en diferentes partes del océano.

2.4.1. Historia del canal SOFAR

En la primavera de 1944, los oceanógrafos Maurice Ewing y J. Worzel [36] partieron de Woods Hole, Massachusetts [37], a bordo del buque de investigación R/V Saluda, para probar una teoría que predecía que el sonido de baja frecuencia debía poder viajar largas distancias en las profundidades oceánicas. En el R/V Saluda se colgó un hidrófono receptor a una profundidad de 693 m. Un segundo barco lanzó cargas explosivas de 4 libras preparadas para estallar en las profundidades del océano a distancias de hasta 900 millas del hidrófono del R/V Saluda. Ewing y Worzel escucharon por primera vez el sonido característico de una transmisión SOFAR, consistente en una serie de pulsos que se acumulan hasta alcanzar su clímax.

Una única fuente explosiva se escucha como una serie de llegadas separadas, lo que conduce a la firma característica de una transmisión SOFAR que se construye hasta su clímax. En palabras de Ewing y Worzel, “el final de la transmisión del canal de sonido era tan agudo que era imposible que el observador menos avezado lo pasara por alto” [38]. En 1946, Leonid Brekhovskikh y sus colegas de la antigua Unión Soviética, realizaron de forma independiente un descubrimiento similar mientras llevaban a cabo experimentos en el Mar de Japón.

Incluso antes de que finalizara la Segunda Guerra Mundial, la Marina de los Estados Unidos llevó a cabo experimentos con el uso de transmisiones de largo alcance como una herramienta para salvar vidas. La idea era que los sobrevivientes de un avión derribado o de un barco hundido pudieran lanzar una pequeña carga explosiva diseñada para estallar en el canal de sonido del océano. Los tiempos de llegada de la señal a una serie de estaciones de escucha ubicadas en tierra se utilizarían para calcular la posición de la balsa salvavidas. Este proyecto fue conocido como SOund Fixing and Ranging, que es el acrónimo que da nombre al canal SOFAR [39].

La Marina de EE. UU. no tardó en darse cuenta de que la capacidad del sonido de baja frecuencia para viajar largas distancias en las profundidades del océano, podía utilizarse para aumentar el alcance de detección de los submarinos. En la década de 1950, la Marina estadounidense lanzó un proyecto con el nombre en clave Jezabel. Más tarde se conocería como SOund SURveillance System, SOSUS [40]. Se colocaron varios conjuntos de hidrófonos en el fondo del océano y se conecta-

ron mediante cables submarinos a centros de procesamiento situados en tierra. El sistema SOSUS tuvo mucho éxito en la detección y seguimiento de los ruidosos submarinos soviéticos de la época. Los marineros que operaban las primeras baterías SOSUS también detectaron algunos sonidos cuyas fuentes se desconocían al principio. Un sonido desconocido en particular se atribuyó al “Monstruo de Jezebel”. Más tarde se descubrió que se trataba de vocalizaciones de baja frecuencia de ballenas [41].

Posteriormente, los oceanógrafos se dieron cuenta de que la velocidad y la dirección de las corrientes oceánicas profundas, podían medirse utilizando flotadores diseñados para ir a la deriva con la corriente a media profundidad, y transmitir señales acústicas de baja frecuencia a intervalos regulares. Las señales acústicas se recibían originalmente en las baterías de hidrófonos de SOSUS y las horas de llegada se utilizaban para calcular las posiciones de los flotadores. Como las fuentes de sonido a la deriva eran costosas, pronto se cambió el enfoque para utilizar un receptor a la deriva. Se diseñaron receptores de bajo coste para derivar a media profundidad y registrar las transmisiones de las fuentes sonoras ancladas. Los flotadores, llamados RAFOS [42-44] (SOFAR deletreado al revés), salían a la superficie al final de su vida útil y enviaban por radio a tierra vía satélite, las horas de llegada que habían registrado, a partir de las cuales podían calcularse las posiciones de los flotadores a medida que derivaban con las corrientes oceánicas. Más tarde, los oceanógrafos se dieron cuenta de que las mediciones precisas de los tiempos de viaje entre fuentes y receptores ampliamente espaciales podían utilizarse para medir la variabilidad de la temperatura oceánica a gran escala.

2.4.2. Velocidad mínima del sonido

La velocidad del sonido en el océano se ve afectada por la temperatura, la salinidad y la presión. Como se mencionó en la sección 2.1, el sonido viaja más rápido a medida que aumenta la temperatura, la salinidad y la presión. En las profundidades del océano abierto en latitudes medias, que se encuentran aproximadamente a medio camino entre el ecuador y el polo norte o sur, la temperatura del agua disminuye a medida que aumenta la profundidad, la salinidad puede aumentar o disminuir con la profundidad, y la presión siempre aumenta con la profundidad [14, 15].

En las latitudes medias, la velocidad del sonido alcanza su valor mínimo, alrededor de 1000 m de profundidad. Cerca de la superficie, la velocidad del sonido disminuye a medida que aumenta la profundidad debido a la reducción de la temperatura. Sin embargo, en la superficie, la velocidad del sonido es más rápida

debido al calentamiento solar de las capas superiores del océano. A medida que se adentra en mayores profundidades, la temperatura del agua se vuelve progresivamente más fría hasta alcanzar un valor casi constante de aproximadamente 2°C para profundidades inferiores a unos 1000 m, como se muestra en el perfil típico (ver figura 2.2). En esta región de temperatura casi constante, la presión del agua se convierte en el factor determinante para la velocidad del sonido. Dado que la presión aumenta con la profundidad, también lo hace la velocidad del sonido. En cambio, la salinidad tiene un efecto mucho menor en la velocidad del sonido en comparación con la temperatura o la presión en la mayoría de las áreas oceánicas. Esto se debe a que los cambios en la salinidad son pequeños en aguas abiertas y su efecto en la velocidad del sonido es insignificante [17, 21, 23].

Como resultado, se produce una disminución en la velocidad del sonido alrededor de los 1000 m de profundidad en latitudes medias. Este mínimo en la velocidad del sonido crea un canal sonoro o guía de ondas a través del cual el sonido puede propagarse a largas distancias. Por esta razón, se le conoce como el canal SOFAR.

2.4.3. Desplazamiento del sonido en el canal SOFAR

En el océano profundo, en latitudes medias, se produce una disminución en la velocidad del sonido en una profundidad que oscila entre 800 a 1000 m. Esta zona se conoce como el *mínimo de velocidad del sonido*. El mínimo de velocidad del sonido crea un canal sonoro en el cual las ondas pueden viajar distancias largas. El sonido se concentra en este canal debido a la refracción continua de las ondas hacia la región de menor velocidad del sonido [45]. Cuando el sonido se propaga hacia arriba desde una fuente ubicada en el mínimo de velocidad del sonido, se desvía hacia arriba, hacia el mínimo. De manera similar, cuando el sonido se propaga hacia abajo desde la fuente, se desvía hacia arriba, también en dirección al mínimo de velocidad del sonido.

La figura 2.9 presenta dos partes. A la izquierda, se representa la velocidad del sonido en función de la profundidad. El mínimo de velocidad del sonido a una profundidad de 1000 m se denomina canal de sonido profundo o, más históricamente, canal SOFAR. A la derecha, se muestran las trayectorias que siguen las ondas sonoras a medida que se alejan de la fuente. Estas ondas se refractan continuamente hacia el mínimo de velocidad del sonido.

En esta figura, las distancias verticales están muy exageradas en comparación con las horizontales. Esto hace que los ángulos desde la horizontal a los que viajan las ondas sonoras parezcan mucho más pronunciados de lo que realmente son.

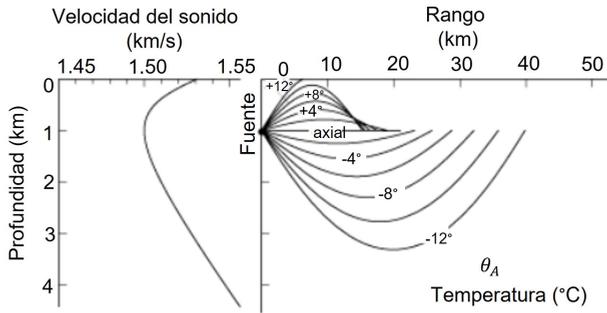


Figura 2.9: Perfil de la velocidad del sonido y su trayectoria a través de la columna de agua. A la izquierda, la velocidad del sonido en función de la profundidad. A la derecha, se muestran las trayectorias seguidas por las ondas sonoras a medida que se alejan de una fuente sonora situada a una profundidad de 1000 m, en el eje del canal sonoro. Solo se muestran los rayos que no chocan con la superficie o el fondo del océano. (Adaptado por los autores de [45])

Las trayectorias más empinadas que se muestran, solo se alejan unos 12°C de la horizontal y en realidad son casi horizontales.

Solo algunas ondas sonoras logran permanecer en el canal sonoro sin interactuar con la superficie o el fondo del océano. Estas ondas, que se propagan hacia arriba desde la fuente con ángulos inferiores a 12°C , experimentan refracción hacia el mínimo de velocidad del sonido antes de alcanzar la superficie [17, 45]. Del mismo modo, las ondas sonoras que viajan hacia abajo desde la fuente con ángulos inferiores a 12°C se refractan hacia el mínimo antes de llegar al fondo marino. Las ondas sonoras que se propagan hacia arriba desde la fuente con ángulos más pronunciados aún experimentan refracción, pero no lo suficiente como para evitar colisionar con la superficie del océano. Por otro lado, las ondas sonoras que se propagan hacia abajo desde la fuente con ángulos más pronunciados no se refractan lo suficiente como para evitar colisionar con el fondo marino.

El sonido pierde energía cuando choca con la superficie o el fondo del océano (ya hemos estudiado las pérdidas energéticas, sección 2.2). Siempre que el sonido se refleja en la superficie rugosa del océano o en el fondo marino, parte de la energía sonora se dispersa y se pierde [46, 47]. Una onda sonora que golpea muchas veces la superficie o el fondo del océano será demasiado débil para ser detectada.

El sonido que no golpea la superficie del océano o el fondo marino seguirá perdiendo energía debido a la absorción [48]. Aun así, los sonidos de baja frecuencia pierden muy poca energía, esto se debe a que las bajas frecuencias que no inter-

actúan con la superficie o el fondo del océano pueden detectarse después de viajar largas distancias a través del océano.

La absorción del sonido aumenta a medida que la frecuencia del sonido aumenta, lo que significa que los sonidos de mayor frecuencia solo se pueden detectar a distancias más cortas. La detección de sonidos también depende del volumen de la fuente y del volumen del ruido de fondo en el ambiente.

Las ondas sonoras que se propagan a través del canal sonoro siguen múltiples trayectorias. Cuando la fuente de sonido y el receptor se encuentran a la misma profundidad que el mínimo de velocidad del sonido, es decir, en el eje del canal sonoro o SOFAR, las ondas sonoras viajan principalmente en línea recta a lo largo del eje y experimentan ciclos de curvatura por encima y por debajo del eje, llegando a casi alcanzar tanto la superficie como el fondo.

Aunque el sonido se aleja de una fuente sonora en todas las direcciones, solo el sonido que se aleja de una fuente por trayectorias que salen en ángulos específicos llegará a un receptor situado en un lugar concreto. Las ondas sonoras que viajan por estas trayectorias diferentes tienen tiempos de viaje ligeramente distintos. Por lo tanto, una única fuente explosiva se oirá como varias llegadas separadas, lo que dará lugar a la firma característica de una transmisión SOFAR [39].

El pulso sonoro final generalmente es el más intenso y proviene de la onda sonora que se propaga cerca del eje del canal sonoro. Aunque esta onda sonora recorre la distancia más corta, viaja en la región cercana al mínimo de velocidad del sonido, donde es más baja.

Las trayectorias que seguirá el sonido para una fuente cercana a la superficie del océano son bastante diferentes. Si el canal de sonido profundo se extiende hasta la superficie, los rayos que parten de la fuente casi horizontalmente no golpearán la superficie del océano ni el fondo marino. Los sonidos que recorren estas trayectorias pueden detectarse a grandes distancias, al igual que ocurre con los sonidos que se alejan de una fuente profunda y no interactúan con la superficie o el fondo del océano. Las trayectorias sonoras de una fuente cercana a la superficie se juntan, o convergen, creando regiones de mayor presión sonora aproximadamente a la misma profundidad que la fuente, cada 50 a 60 km de distancia. Estas regiones de mayor presión sonora se denominan zonas de convergencia, como se observa en la figura 2.10. Entre las zonas de convergencia, hay regiones de menor presión sonora llamadas zonas de sombra [17, 45].

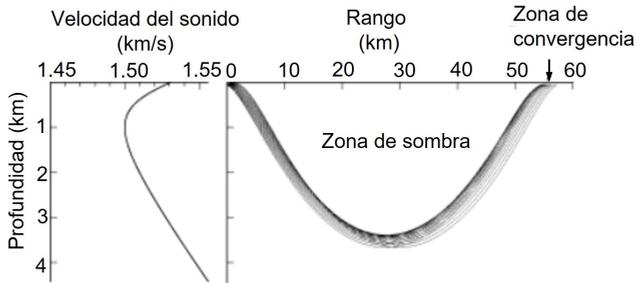


Figura 2.10: Zona de convergencia. A la izquierda, perfil de la velocidad del sonido en función de la profundidad. A la derecha se representan las trayectorias seguidas por las ondas sonoras que se alejan de una fuente ubicada a 50 m de profundidad. Solo se muestran los rayos que no chocan con la superficie o el fondo del océano. Estos rayos se vuelven a juntar cerca de la superficie a una distancia de aproximadamente 55 km, formando una zona de convergencia. Los rayos no alcanzan la región cercana a la superficie entre la fuente y la zona de convergencia, formando una zona de sombra. (Adaptado de [45])

2.4.4. Variabilidad del canal sonoro

La forma en que la velocidad del sonido cambia con la profundidad no es la misma en todos los lugares del océano, ya que los perfiles de temperatura y salinidad del océano que determinan la velocidad del sonido pueden diferir mucho de un lugar a otro del océano.

En la figura 2.11 se muestra el perfil de las profundidades del océano abierto, aproximadamente entre 40°S y 40°N. En esta región, la temperatura disminuye a medida que aumenta la profundidad, mientras que la presión aumenta con la profundidad. La velocidad del sonido cerca de la superficie en esta región disminuye a medida que aumenta la profundidad debido a la disminución de la temperatura. A medida que la profundidad aumenta, la temperatura del agua se vuelve progresivamente más fría hasta alcanzar un valor casi constante de alrededor de 2°C por debajo de una profundidad de aproximadamente 1000 m. Cuando la temperatura se vuelve casi constante, la presión del agua se convierte en el factor predominante que afecta la velocidad del sonido. Debido a que la presión aumenta con la profundidad, la velocidad del sonido también aumenta. En cambio, la salinidad tiene un efecto mucho menor en la velocidad del sonido en comparación con la temperatura o la presión en la mayoría de las áreas del océano [17, 45, 47].

Más allá de los 40°C de latitud, el océano presenta una temperatura casi uniformemente fría desde la superficie hasta las profundidades. La presión siempre

aumenta con la profundidad, lo que implica que la velocidad del sonido es más baja en la superficie o cerca de ella, y aumenta a medida que se profundiza. Como resultado, el eje del canal sonoro con la velocidad mínima del sonido se encuentra en la superficie del océano o en su proximidad. En términos más generales, la profundidad en la que se encuentra el mínimo de velocidad del sonido varía de manera compleja según la ubicación, en función de la estructura detallada de la temperatura y la salinidad.

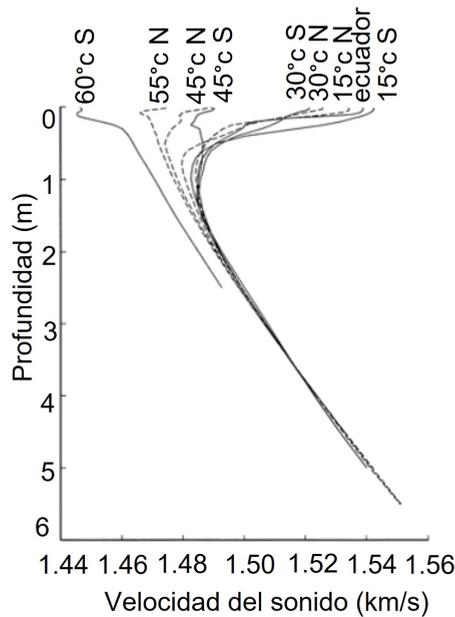


Figura 2.11: Perfiles anuales de la velocidad media del sonido desde 60° S hasta 55° N a lo largo de 150° W en el Océano Pacífico. Las velocidades del sonido en el océano profundo tienden a ser todas iguales debido a la temperatura casi uniforme a través de la latitud en profundidad. (Adaptado por los autores de [45])

Por otro lado, una onda sonora que viaja por el océano se refracta (se dobla) cada vez que se encuentra con cambios en la velocidad del sonido, haciéndolo continuamente hacia la región de menor velocidad del sonido, un ejemplo de esto se muestra en la figura 2.12. Por lo tanto, los distintos perfiles de velocidad del sonido hacen que las ondas sonoras recorran trayectorias muy diferentes.

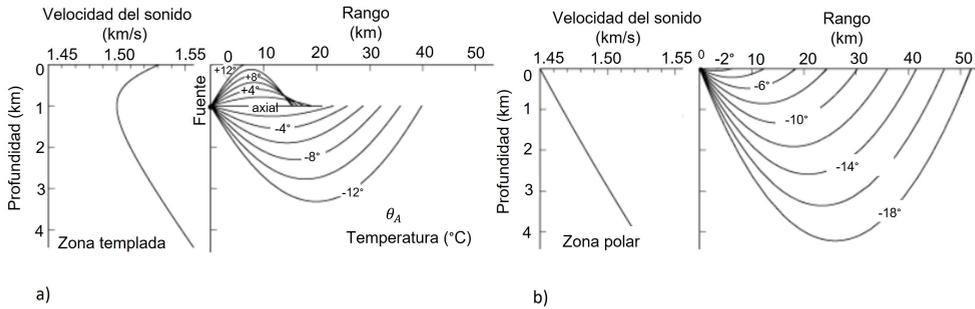


Figura 2.12: Perfiles de la velocidad del sonido en zona templada y polar, y diagramas de rayos para fuentes en el eje (solo se muestran los rayos que no chocan con la superficie o el fondo del océano). En (a), la fuente está situada a 1000 m de profundidad en el eje del canal sonoro, en (b), la fuente está situada en la superficie. A la izquierda de cada figura, se presenta el perfil de la velocidad del sonido en función de la profundidad y la derecha de cada figura, las trayectorias seguidas por las ondas sonoras a medida que se alejan de la fuente. (Adaptado de [45])

En latitudes medias, el sonido que se desplaza hacia arriba desde una fuente en la velocidad mínima del sonido se desvía hacia el mínimo. Del mismo modo, el sonido que viaja hacia abajo desde la fuente se desvía hacia arriba, hacia el mínimo. Como resultado, el sonido puede viajar largas distancias, siguiendo un ciclo por encima y por debajo del mínimo de velocidad del sonido sin chocar con el fondo marino o la superficie del océano.

En latitudes altas, todo el sonido se desvía hacia el mínimo de velocidad del sonido en la superficie. Esto provoca que las ondas sonoras formen un bucle hacia el océano antes de regresar a la superficie, donde se reflejan y vuelven a formar un bucle hacia el océano. Cuando el sonido se refleja en la superficie rugosa del océano, parte de la energía sonora se dispersa y se pierde. Una onda sonora que impacta la superficie del océano tiende a debilitarse más rápidamente que una que no lo hace.

En el caso de frecuencias muy bajas, donde la longitud de onda del sonido es mayor que la altura de las ondas superficiales, la superficie del océano parece relativamente lisa para la onda sonora. La mayor parte de la energía sonora se refleja y el sonido de baja frecuencia puede viajar largas distancias.

2.5. ¿CÓMO SE PROPAGA EL SONIDO DEL AIRE AL AGUA?

En las situaciones más sencillas, el sonido viaja a través de un medio en línea recta. Sin embargo, en algún momento, el medio puede sufrir cambios de temperatura, salinidad o presión que hagan variar la velocidad del sonido. Este cambio en la velocidad del sonido lo curvará o refractará. El sonido se curvará hacia la región con una velocidad sonora más lenta, como se ha comentado anteriormente.

En otros casos, el sonido puede encontrarse con un medio de densidad diferente. Un caso especialmente importante es cuando el sonido que viaja por el aire se encuentra con el agua [49, 50] como se muestra en la figura 2.13. Una parte de la onda sonora se reflejará lejos del agua y se dirigirá hacia el aire, mientras que otra parte se transmitirá al agua. Durante la reflexión, la dirección de la onda entrante cambia.

La onda original que se dirige hacia la frontera se denomina onda incidente (representada por la línea de color naranja). Al chocar con la frontera, su trayectoria se desvía, lo que resulta en la formación de la onda reflejada (representada por la línea azul) que se aleja de la frontera formando un ángulo. La línea normal (representada por la línea negra) es perpendicular a la frontera y define dos ángulos iguales: el ángulo de incidencia (representado en esta figura como " $\angle I$ ") y el ángulo de reflexión (representado como " $\angle R$ "). También se utiliza un tercer ángulo en acústica, el ángulo de refracción (representado en esta figura como " $\angle G$ "), que es el ángulo complementario al ángulo de incidencia.

Además de la reflexión, la onda sonora también puede transmitirse al agua. La cantidad de energía transmitida depende del ángulo de incidencia y de las propiedades acústicas de los dos medios. Se produce más transmisión en relación con la reflexión si las propiedades acústicas de los dos medios son similares. Como la velocidad del sonido es diferente en el aire y en el agua, se producirá una refracción de la onda sonora al pasar de un medio a otro.

La onda sonora también puede transmitirse al agua. La cantidad de energía transmitida depende del ángulo de incidencia y de las propiedades acústicas de los dos medios. Se produce más transmisión en relación con la reflexión si las propiedades acústicas de los dos medios son similares. Como la velocidad del sonido en el agua es mayor que en el aire, existe un ángulo de incidencia especial denominado ángulo crítico, θ_c . Cuando el sonido llega con un ángulo de incidencia mayor que el ángulo crítico, se refleja casi perfectamente (la línea azul de la figura 2.14) [51]. Cuando el ángulo de incidencia del sonido es inferior al ángulo crítico, una parte de la onda penetra en el agua (la línea amarilla de la figura 2.14). Para el caso

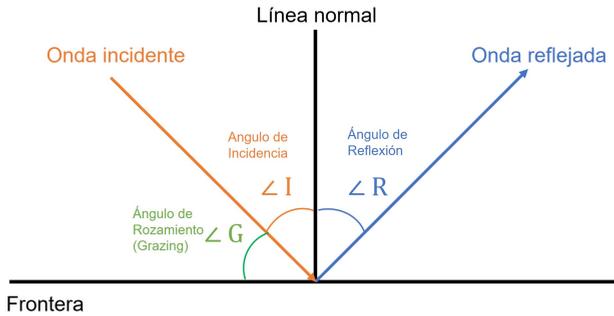


Figura 2.13: Ilustración de cómo se propaga el sonido cuando viaja de un medio a otro. (Elaboración propia)

concreto del sonido que entra en el agua desde el aire, el ángulo crítico θ_c es de unos 15° con respecto a la línea normal.

Esta ciencia adquiere importancia al analizar cómo ciertas actividades antropogénicas [52], como la producción de energía eólica [53], pueden afectar a los animales marinos. Una preocupación particular son las vías acústicas a través de las cuales el sonido generado por los aerogeneradores puede ingresar al agua y afectar la vida marina.

Cuando las palas de un aerogenerador giran, generan un sonido de baja frecuencia que puede transmitirse al agua a través de la interfaz aire-agua. Sin embargo, esta transmisión solo ocurre cuando la energía sonora alcanza el límite aire-agua con ángulos de incidencia inferiores al ángulo crítico. Por lo tanto, la transmisión aire-agua solo ocurre a distancias cercanas a la turbina.

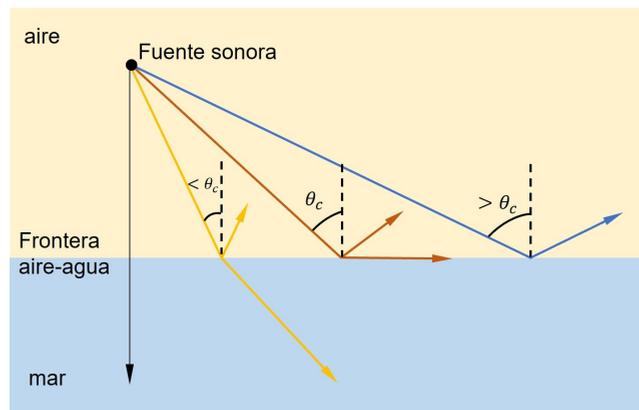


Figura 2.14: Ilustración de una onda propagándose en la frontera aire-agua. Las trayectorias resultantes en cuatro ángulos diferentes de incidencia en el límite aire-agua: a 90° , menos que el ángulo crítico ($< \theta_c$), en el ángulo crítico (θ_c), y mayor que el ángulo crítico ($> \theta_c$). (Elaboración propia)

3. ¿CÓMO SE MIDE EL SONIDO?

La medición del sonido es fundamental para comprender su naturaleza y evaluar su impacto en nuestro entorno auditivo y en el medio marino. Es por esto que en la sección 3.1, comentaremos cuáles son los dispositivos utilizados para grabar el sonido y sus características. A continuación, en la sección 3.2, se explican las unidades utilizadas para medir el sonido y cómo se lleva a cabo esta medición. Nos adentraremos en el mundo de la acústica y descubriremos que el sonido se mide en decibeles dB, una escala logarítmica que nos permite cuantificar su intensidad y comparar niveles sonoros. En la sección 3.3, se comentan otras unidades complementarias que tiene en cuenta la sensibilidad del oído humano a diferentes frecuencias. Además, indagaremos en cómo se mide la audición humana, a través de pruebas y exámenes audiométricos que evalúan nuestra capacidad para percibir diferentes frecuencias e intensidades. También examinaremos cómo se mide el sonido en el océano, considerando las peculiaridades y desafíos asociados con esta tarea. Por último, en la sección 3.4, nos preguntaremos qué sonidos pueden oír las personas, explorando el rango audible y las frecuencias que somos capaces de captar. Comprender cómo se mide el sonido y qué sonidos somos capaces de percibir nos permitirá apreciar mejor el impacto que tiene en las personas y en el medio marino.

3.1. LOS HIDRÓFONOS

Al igual que los micrófonos se utilizan para captar el sonido en el aire, existen dispositivos llamados hidrófonos que se emplean para escuchar el sonido bajo el agua. Los micrófonos convierten las ondas sonoras del aire en señales eléctricas, las cuales pueden amplificarse, grabarse, reproducirse a través de altavoces y transmitirse. Estas señales también pueden utilizarse para medir características del sonido como la amplitud y la frecuencia. De manera similar, los hidrófonos convierten las ondas sonoras del agua en señales eléctricas que pueden amplificarse, grabarse, reproducirse y utilizarse para medir las características del sonido. Estos dispositivos “escuchan” el sonido, pero no lo transmiten [54-57]. Dado que están especialmente diseñados para su uso bajo el agua, los hidrófonos suelen llevar una funda de goma para protegerlos. En la figura 3.1 se presentan algunos ejemplos de hidrófonos comerciales.



Figura 3.1: Fotografía de hidrófonos comerciales. A la izquierda el ITC1032 y a la derecha el Reson TC4034. (Elaboración propia)

Ya en 1490, cuando Leonardo da Vinci [58] escribió sobre ello, se escuchaban sonidos submarinos con tubos de aire. Sin embargo, no fue hasta mediados y finales del siglo XIX cuando se desarrolló la tecnología para convertir las señales acústicas en señales eléctricas. Esta tecnología avanzó lo suficiente como para que en la Segunda Guerra Mundial, científicos británicos, franceses y estadounidenses utilizaran la ecografía para localizar icebergs y submarinos.

La mayoría de los hidrófonos están fabricados con un material piezoeléctrico [59-62]. Este material tiene una propiedad especial que le permite producir señales eléctricas cuando se expone a cambios de presión. Dado que el sonido es una onda de presión, este puede ser detectado por un elemento piezoeléctrico. Bajo la presión de una onda sonora, el elemento piezoeléctrico se comprime, y emite señales eléctricas. Estas señales pueden registrarse y analizarse posteriormente para determinar las propiedades de la onda, incluidas la amplitud y la frecuencia.

Algunos hidrófonos, llamados omnidireccionales, registran sonidos procedentes de todas las direcciones con la misma sensibilidad. Otros, llamados hidrófonos

direccionales, son más sensibles a las señales procedentes de una dirección concreta [63]. Los hidrófonos direccionales suelen utilizarse en sistemas de localización y seguimiento de objetos [64, 65].

3.2. ¿QUÉ UNIDADES SE UTILIZAN PARA MEDIR EL SONIDO?

Las ciencias implican la medición cuantitativa de las propiedades del mundo natural. Cuando un científico realiza mediciones, es necesario identificar previamente las propiedades específicas que serán medidas, así como determinar el método de medición y las unidades que se utilizarán. Por ejemplo, si un científico está midiendo la profundidad del agua, no es suficiente decir que el agua tiene una profundidad de 250, ya que esta cifra podría significar 250 pies, 250 m o 250 brazas. Por lo tanto, el científico debe especificar las unidades correspondientes a ese valor.

El estándar de medida es el Sistema Internacional de Unidades SI, comúnmente conocido como sistema métrico decimal, estas unidades se utilizan universalmente en ciencia e ingeniería.

También es importante saber cómo convertir las unidades. La mayoría de las personas saben que 12 pulgadas equivalen a 1 pie, pero puede que no sepan que 1 milla náutica equivale a 1,85 km. En general se sabe que 1 km equivale a 1000 m, pero no tanto que 1 μm equivale entre 10 a 6 m.

Hay unidades fijas, como los metros m, y unidades relativas, como los decibeles dB. Las unidades relativas están relacionadas con condiciones específicas. Por ejemplo, los decibeles en el agua tienen un valor relativo diferente a los decibeles en el aire. Los científicos han acordado utilizar 1 micropascal, 1 μPa como presión de referencia para el sonido bajo el agua. Sin embargo, en el aire, se ha acordado utilizar una presión de referencia mayor, correspondiente a 20 μPa .

A continuación, se presentan algunas unidades comunes utilizadas en el sonido submarino, para qué se utilizan y cómo se pueden convertir entre sí.

- **Unidades comunes – Distancia**

1 metro (m): unidad de distancia; equivale a 3,28 pies.

1 kilómetro (km) = 1000 m

1 centímetro (cm) = 0,01 m (100 cm = 1 m)

1 milímetro (mm) = 0,001 m (1000 mm = 1 m)

1 micrómetro (μm , también 1 micra) = 10^{-6} m

1 milla náutica (nm) = 1,85 km o 1,15 millas

- **Peso / Masa**

1 gramo (g) - unidad de masa

1 kilogramo (kg) = 1000 g = 2,2 lbs

1 tonelada métrica = 1000 kg

1 tonelada - unidad de peso; equivale a 2000 libras (lbs)

- **Tiempo**

1 segundo (s) - una unidad de tiempo

1 milisegundo (ms) = 0,001 s (10^{-3} s) (1000 ms = 1 s)

1 microsegundo (μs) = 0,000 001 s (10^{-6} s) (1000000 μs = 1 s)

- **Temperatura**

Grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) y Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) - unidades de temperatura

Para convertir de grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) a grados Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$): $^{\circ}\text{F} = (^{\circ}\text{C} \times 1,8) + 32$

Para convertir de Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) a Celsius ($^{\circ}\text{C}$): $^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \div 1,8$

- **Salinidad**

1 parte por mil (ppt) = 1 g de sal por litro de solución; unidad de proporción igual a 0001.

Unidades Prácticas de Salinidad (PSU o psu). La relación de conductividad de una muestra de agua de mar con una solución estándar de cloruro potásico. Dado que las proporciones no tienen unidades, no es cierto que 35 PSU equivalgan exactamente a 35 ppt.

- **Frecuencia**

1 hercio (Hz) = 1 ciclo por segundo - una unidad de frecuencia

1 kilohercio (kHz) = 1000 Hz

- **Presión**

1 pascal (Pa) - una unidad de presión

1 micropascal (μPa) = 10^{-6} Pa - se utiliza habitualmente para medir la presión acústica.

1 atmósfera (atm) = 101 325 Pa

- **Intensidad**

decibel (dB) - medida de la intensidad de un sonido; 1/10 de un Bel.

Los decibelios son una unidad relativa que compara dos presiones; por lo tanto, también debe indicarse una presión de referencia. En acústica submarina, la presión de referencia es $1 \mu\text{Pa}$, por lo que la verdadera unidad de intensidad del sonido subacuático es el dB referido a $1 \mu\text{Pa}$. En el aire, los científicos han acordado utilizar una presión de referencia de $20 \mu\text{Pa}$. Por lo tanto, la verdadera unidad de intensidad para los sonidos en el aire es el dB referido a $20 \mu\text{Pa}$ [66]. Dado que utilizan presiones de referencia diferentes, la intensidad del sonido expresada en dB en el agua no es la misma que la expresada en dB en el aire.

3.3. ¿CÓMO SE MIDE LA AUDICIÓN?

La audición es un sentido crucial tanto para los seres humanos como para la mayoría de los animales. Los mamíferos marinos, en particular, tienen la capacidad de percibir sonidos que las personas no pueden escuchar. La capacidad auditiva tanto de las personas como de los animales está determinada por la frecuencia y la intensidad de los sonidos. En el caso de los seres humanos, somos más sensibles a los sonidos utilizados en la comunicación, como los empleados en las conversaciones. Por otro lado, los animales tienen una mayor sensibilidad auditiva hacia los sonidos críticos para su supervivencia, como los emitidos por depredadores, presas y parejas.

En relación con las pruebas de audición realizadas en las personas, estas se llevan a cabo en una habitación especialmente silenciosa y utilizando auriculares. Durante las pruebas, se reproducen sonidos a diferentes frecuencias e intensidades, y la persona debe indicar cuándo percibe un tono. Estas pruebas, conocidas como pruebas de audición conductual, son un ejemplo de las mismas y se ilustran en la fotografía de la figura 3.2.



Figura 3.2: Fotografía de una prueba de audición. (Fuente: todoido.es/pruebas-auditivas-porque-son-importantes/)

Las pruebas de audición conductuales se realizan en animales que pueden responder si oyen un sonido [67-73]. Sin embargo, en muchos casos los animales o los bebés no pueden responder, por lo que otro método para medir la audición, consiste en registrar las respuestas electrofisiológicas del sistema auditivo, estimándola a partir de la actividad eléctrica de distintas partes del sistema auditivo central (cerebro). Pequeños electrodos colocados en la superficie de la cabeza del animal o de la persona registran el voltaje producido al reproducir sonidos de diferentes frecuencias e intensidades. Para comprobar realmente el propio oído, puede realizarse una prueba electrofisiológica de la cóclea (oído interno), denominada prueba de “otoemisiones acústicas” OAE¹. Para realizar esta prueba, se coloca en el oído una sonda que contiene un micrófono y un altavoz. La sonda genera sonidos y se registran los sonidos devueltos por la cóclea.

Estos tipos de pruebas auditivas determinan qué frecuencias y niveles sonoros pueden oírse en el momento de la prueba. Esta información se presenta por medio de una curva audiométrica como la que se presenta en la figura 3.3. Esta, muestra la gama de sonidos que las personas pueden oír, con la frecuencia en el eje X y el nivel sonoro o intensidad en el eje Y. En la figura 3.3, la zona de color azul claro muestra los sonidos que pueden oír las personas con audición normal, y la zona azul oscura presenta el contexto del habla humana.

Los audiogramas humanos suelen trazar el umbral de audición en relación con una curva normalizada que representa la audición normal [74]. Por lo tanto, las unidades del eje Y son decibelios de nivel de audición, citados como dB HL. En

¹OAE: Del inglés, Otoacoustic Emissions.

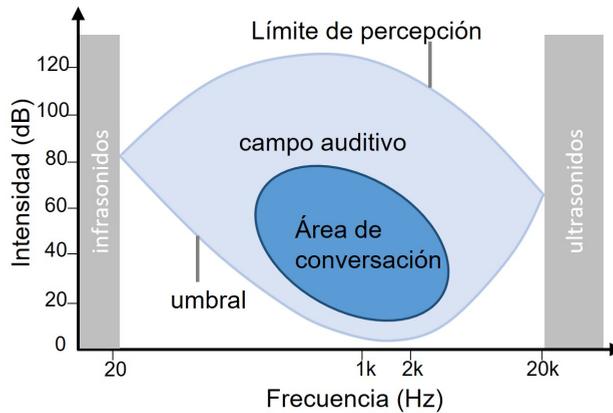


Figura 3.3: Curva audiométrica que muestra la gama de sonidos que las personas pueden oír. Está delimitada en la parte inferior por el umbral de audición y en la parte superior por el límite de percepción. (Elaboración propia)

la figura 3.4 se muestra el audiograma de un ser humano, donde las “O” rojas representan la audición en el oído derecho y las “X” azules representan la audición en el oído izquierdo. La audición normal se clasifica entre -10 dB HL y 15 dB HL.

A medida que las personas envejecen, es habitual perder audición en las frecuencias más altas. De las personas de 23 a 44 años, el 23% tiene alguna pérdida de audición. Esta cifra aumenta hasta el 43% en las personas de 65 años o más. Normalmente, solo las personas menores de 20 años pueden oír a 17 kHz o más. En el siguiente sitio web el lector puede probar la frecuencia más alta a la que puede oír: <http://www.ultrasonic-ringtones.com/>.

3.4. ¿QUÉ SONIDOS PUEDEN OÍR LAS PERSONAS?

Las personas pueden oír sonidos en frecuencias comprendidas entre unos 20 Hz y 20 kHz, aunque oyen mejor los sonidos entre 1 kHz y 5 kHz, donde se centra el habla humana. La pérdida de audición puede reducir la gama de frecuencias que una persona puede oír. Es habitual que las personas pierdan la capacidad de oír frecuencias más altas a medida que envejecen, tal como se comentó anteriormente.

La intensidad del sonido medida por los científicos no es equivalente a la sonoridad. La sonoridad se refiere a cómo las personas perciben el sonido [75]. Los

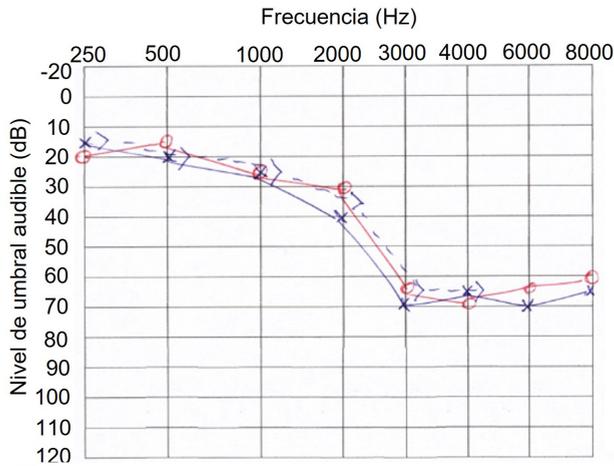


Figura 3.4: Curva de audición humana que muestra una pérdida de audición a partir de 500 Hz tanto en el oído derecho (“O” roja) como en el izquierdo (“X” azul). (Fuente: audiologiaacademica.blogspot.com/2014/09/audiometria-diagnostico-audiologico.html)

sonidos más suaves que los adultos jóvenes pueden escuchar en un rango de frecuencia de 1 kHz a 3 kHz tienen una sonoridad medida de 0 dB en relación con la intensidad de una onda sonora con una presión de $20 \mu\text{Pa}$ dB.

La figura 3.5, presenta una curva de igual sonoridad. El eje Y muestra la intensidad relativa en decibeles referida a $20 \mu\text{Pa}$. El eje X corresponde a la frecuencia de un sonido en una escala logarítmica. Las curvas de nivel son líneas de igual intensidad percibidas para sonidos de distintas frecuencias.

Si las personas oyeran igual de bien en todas las frecuencias, las curvas de nivel serían planas porque la misma intensidad sonora medida se percibiría igual de fuerte con independencia de la frecuencia sonora. De hecho, las personas no oyen tan bien a bajas frecuencias [75]. Por lo tanto, la intensidad relativa del sonido tiene que ser mucho mayor para que un sonido de baja frecuencia se perciba tan alto como un sonido a una frecuencia que las personas oigan bien, como por ejemplo, 1 kHz.

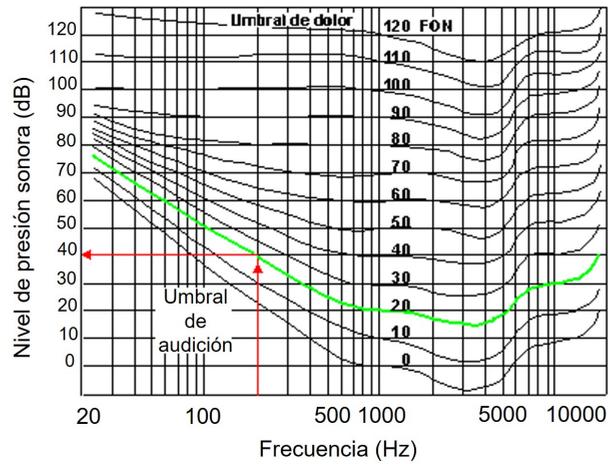


Figura 3.5: Curvas de igual intensidad. (Adaptado por los autores de [2])

4. LOS SONIDOS EN EL MAR

Los sonidos en el mar constituyen un fascinante campo de estudio que permite sumergirnos en el mundo de la acústica submarina. En este sentido, nos adentraremos en la sección 4.1, en los diferentes tipos de sonidos submarinos más comunes y exploraremos sus orígenes y características, describiendo el ruido ambiental oceánico, y analizando los procesos físicos naturales que generan los sonidos. También se describen aquellos sonidos generados por actividades humanas que impactan en el ambiente marino. En la sección 4.2, se explicará la diferencia entre el sonido en el aire y en el agua, destacando las particularidades y propiedades únicas que los distinguen. En la sección 4.3, se describe el uso de tecnologías como el sonar, que permite la detección y localización de objetos y organismos en el agua. También explicaremos la ecolocalización, una habilidad utilizada por varios animales marinos para orientarse y encontrar presas en su entorno acuático. Por último, en la sección 4.4, nos adentraremos en las propiedades de los sonidos submarinos, entendiendo por qué estas características son fundamentales en la comunicación y percepción acústica en el medio marino. Los sonidos en el mar nos revelan un mundo sonoro, fascinante y complejo, donde tanto la naturaleza como la actividad humana desempeñan un papel importante en la generación y percepción acústica.

4.1. ¿CUÁLES SON LOS SONIDOS SUBMARINOS MÁS COMUNES?

Es importante tener en cuenta que los conceptos de sonido, señal y ruido son distintos: el sonido se refiere a cualquier forma de energía acústica, mientras que el ruido es un subconjunto de sonidos no deseados por un oyente y tiende a ser subjetivo. Por otro lado, toda señal es un sonido que se observa o analiza, por lo tanto, un sonido específico puede ser una señal para algunos y un ruido para otros.

El ruido de fondo o ruido ambiente se compone tanto de sonidos generados por fuentes artificiales creadas por el ser humano, como del ruido intrínseco producido por fuentes naturales. Por ejemplo, el ruido de las olas del mar, el sonido de las gotas de lluvia, las perturbaciones, el tráfico marítimo y las perforaciones, entre otros [76, 77]. Las principales fuentes de este ruido se pueden clasificar por la frecuencia del sonido.

En el rango de frecuencias de 20 a 500 Hz, el ruido ambiental se debe principalmente al ruido generado por el transporte marítimo lejano. Incluso después de eliminar el ruido generado por los barcos cercanos al receptor, aún se pueden detectar barcos distantes, lo que resulta en un mayor nivel de ruido en áreas con mucho tráfico marítimo. En el hemisferio sur, generalmente hay menos barcos, lo que lleva a niveles de ruido ambiental de baja frecuencia que tienden a ser 10 dB más bajos. Sin embargo, es importante destacar que el ruido generado por el transporte marítimo ha aumentado a medida que el número de buques en alta mar ha aumentado.

En la gama de frecuencias de 500 a 100 000 Hz, el ruido ambiental se debe sobre todo a las salpicaduras y burbujas asociadas a las olas rompientes que aumenta con la velocidad del viento.

A frecuencias superiores a 100 kHz, domina el ruido generado por el movimiento aleatorio de las moléculas de agua, denominado ruido térmico. Este ruido establece el último límite de los niveles sonoros mínimos que pueden medirse.

Los sonidos de fondo en el océano pueden resumirse en la figura 4.1 que muestra los niveles sonoros típicos a diferentes frecuencias. Estos niveles se expresan en dB relativos a μPa en una banda de frecuencia de 1 Hz de ancho, que suele escribirse dB re $\mu\text{Pa}/\text{Hz}$.

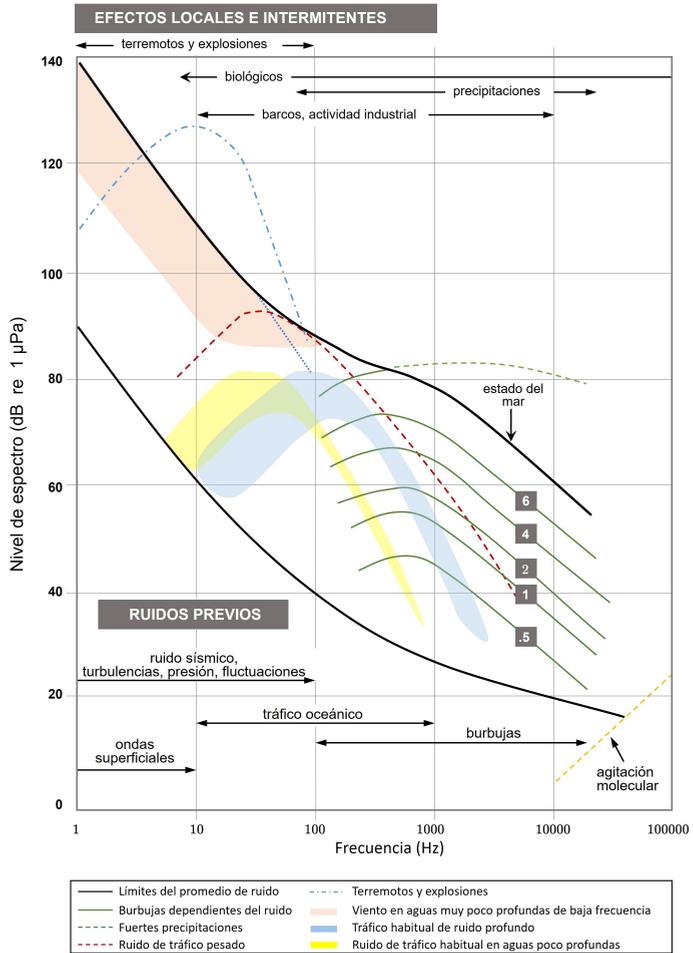


Figura 4.1: Gráfica de Wenz (1962) [78] que representa los niveles sonoros del ruido de fondo del mar en diferentes rangos frecuenciales. (Elaboración propia)

4.1.1. Historia de la investigación sobre el ruido ambiental

El ruido que interfería con la capacidad de oír sonidos submarinos había sido un problema desde principios del siglo XX, cuando la Submarine Signal Company instaló por primera vez campanas submarinas cerca de los faros para advertir a los navegantes de los peligros para la navegación. Sin embargo, el estudio sistemático del ruido ambiental no comenzó hasta la Segunda Guerra Mundial.

Durante la Segunda Guerra Mundial, se desarrollaron minas acústicas que se activaban con el sonido generado por el paso de un barco. Para establecer los niveles de sonido necesarios para activar estas minas y asegurarse de que solo detonaran en presencia de un barco, se requería un conocimiento preciso de los niveles de ruido ambiental. Esta necesidad impulsó el desarrollo de sistemas receptores calibrados para medir estos niveles. Bajo la dirección de Vern Knudsen, director de la División de Investigación de Guerra de la Universidad de California, se llevaron a cabo mediciones del ruido ambiental en aguas costeras y puertos para frecuencias de 1 a 50 kHz. Durante sus investigaciones, observaron que el nivel de ruido aumenta con la velocidad del viento y la altura de las olas. Además, para una velocidad del viento determinada, el nivel de ruido disminuye al aumentar la frecuencia acústica. Estos resultados se resumen en las “curvas de Knudsen”.

La dependencia del ruido ambiental respecto a la velocidad del viento en frecuencias comprendidas entre 1 a 50 kHz aproximadamente, implicaba que las mediciones del ruido ambiental podían utilizarse como herramienta para determinar la velocidad del viento sobre el océano. Este principio se explotó muchos años después en instrumentos oceanográficos a los que se dio el nombre de WOTAN, por “Wind Observations Through Ambient Noise”.

A diferencia del ruido ambiente antes mencionado, que casi siempre está presente, algunos sonidos son intermitentes o solo se producen en regiones limitadas del océano. Hay un gran número de fuentes intermitentes de sonido en el océano, incluidos los procesos físicos naturales, la vida marina y las fuentes artificiales [79-81].

4.1.2. Procesos físicos naturales

Los procesos físicos que generan intermitentemente sonido en el océano incluyen la lluvia, el resquebrajamiento del hielo marino, los terremotos submarinos y las erupciones de los volcanes. Un evento común, como una lluvia intensa, puede aumentar los niveles de ruido causados por burbujas y aerosoles en hasta 35 dB bajo el agua, abarcando una amplia gama de frecuencias que van desde varios cientos de hercios hasta más de 20 kHz.

4.1.3. La Vida marina

Los sonidos producidos por los animales marinos son muchos y variados [82]. Los mamíferos marinos, como las ballenas azules y las marsopas, producen sonidos en una amplia gama de frecuencias, desde menos de 10 Hz hasta más de 100 kHz, dependiendo de la especie de mamífero marino. Muchos peces, como el pez sapo y el guardiamarina, y algunos invertebrados marinos, como los camarones, también producen sonidos.

Los animales marinos utilizan el sonido para obtener información detallada sobre su entorno, y dependen del sonido para comunicarse, navegar y alimentarse. Los delfines usan el sonido para localizar e identificar objetos como comida, obstáculos y otras ballenas. Emitiendo chasquidos, o pulsos cortos de sonido, y escuchando el eco, pueden detectar presas individuales y navegar alrededor de objetos bajo el agua.

De hecho, las llamadas de los mamíferos marinos pueden aumentar los niveles de ruido ambiental en 20 a 25 dB bajo el agua en algunos lugares en determinadas épocas del año. Los rorcuales azules y los rorcuales comunes producen gemidos de baja frecuencia entre los 10 a 25 Hz con niveles de fuente estimados de hasta 190 dB submarinos a 1 m.

En la tabla 4.1 se muestran los niveles de las fuentes de algunos sonidos generados por la vida marina. Estos niveles de fuente están definidos considerando que el receptor se encuentra a un metro de la fuente sonora y disminuyen a medida que el sonido se aleja de ella. Estos niveles de fuente representan la energía acústica en todas las frecuencias generadas por la fuente y se consideran de banda ancha.

Por otro lado, en la figura 4.1 se presentan los niveles sonoros correspondientes al ruido ambiental en un ancho de banda de 1 Hz. Esto significa que la energía acústica se ha sumado únicamente en un rango de frecuencia de 1 Hz. Es impor-

tante destacar que debido a esta diferencia en el ancho de banda, los niveles de la fuente indicados en la tabla 4.1 y los niveles de ruido ambiental en la figura 4.1 no son directamente comparables.

Tabla 4.1: Niveles de fuentes sonoras de algunos mamíferos marinos

Fuente	Nivel de la fuente de banda ancha (dB a 1 m)
Clic del Cachalote [83-85]	163 – 223
Pulsos de delfín tornillo [86]	108 – 115
Silbidos del delfín mular [87]	125 – 173
Gemidos de rorcual común [88]	155 – 186
Gemidos de ballena azul y barbada [89-91]	155 – 188
Tonos, gemidos y cantos de ballena [92, 93]	128 – 189
Emisión del pitido de la ballena franca austral [94, 95]	183 – 192

4.1.4. Sonidos antropogénicos

Los sonidos generados por las actividades humanas constituyen una parte importante del fondo acústico oceánico total [96, 97] y se utiliza para muchos fines valiosos, como la comunicación, la navegación, defensa, investigación, la exploración y la pesca. Sin embargo, algunos sonidos son solo un subproducto de otra actividad, como el ruido generado por los buques y por las actividades industriales en alta mar, incluidas las perforaciones y la producción de petróleo.

Los sonidos generados por las actividades humanas abarcan una amplia gama de frecuencias, desde unos pocos Hz hasta varios cientos de kHz, y una amplia gama de niveles de fuente.

En la tabla 4.2 se indican los niveles de fuente de algunos sonidos generados por actividades humanas.

4.2. ¿EN QUÉ SE DIFERENCIA EL SONIDO EN EL AIRE DEL SONIDO EN EL AGUA?

El sonido en el agua y el aire son ondas que se propagan de forma similar y pueden caracterizarse de la misma manera. Aun así, la forma en que se registran los niveles sonoros en el agua y en el aire es muy diferente, por lo que comparar los niveles sonoros en estos dos medios debe hacerse con cuidado. Cuando se describe un

Tabla 4.2: Niveles de fuentes sonoras generadas por actividades humanas

Buques en navegación [98-100]	Nivel de la fuente de banda ancha (dB a 1 m)
Remolcador y barcaza (18 km/h)	171
Buque de suministros	181
Gran petrolero	186
Rompehielos	193

sonido como fuerte o suave, los científicos dicen que el sonido tiene una amplitud o intensidad alta o baja. La amplitud se refiere al cambio de presión al paso de la onda sonora [1]. Si se aumenta la amplitud de un sonido se hace más fuerte, como cuando se sube el volumen de la radio. Si se disminuye la amplitud, el sonido será más suave, como cuando se baja el volumen (Capítulo 2).

La cantidad de energía por unidad de tiempo se denomina potencia. La intensidad de una onda sonora es, por tanto, la cantidad de energía transmitida a través de un área determinada en la dirección en la que viaja el sonido. La potencia se mide en vatios W, por lo que la intensidad se mide en vatios por metro cuadrado W/m^2 [5].

Un ejemplo de potencia con el que probablemente el lector esté familiarizado son las bombillas, que suelen etiquetarse en función de la cantidad de energía eléctrica que consumen (60 W, 100 W etc.). Las ondas luminosas tienen intensidad, al igual que las ondas sonoras. La potencia que consume una bombilla está directamente relacionada con la intensidad de las ondas luminosas que emite.

Las intensidades sonoras expresadas en W/m^2 pueden compararse directamente entre el agua y el aire. Sin embargo, los científicos suelen especificar la intensidad sonora como un cociente, pasando de una intensidad absoluta a un nivel sonoro relativo. El nivel de intensidad sonora en dB se define como 10 veces el logaritmo de la relación entre la intensidad de una onda sonora y una intensidad de referencia.

La confusión surge porque los niveles sonoros expresados en dB en el agua no son los mismos que los expresados en dB en el aire. Esto se debe a dos razones:

1. Intensidades de referencia: Las intensidades de referencia utilizadas para calcular los niveles sonoros en dB son diferentes en el agua y en el aire. Los científicos han acordado arbitrariamente utilizar como intensidad de referen-

cia para el sonido bajo el agua una onda sonora con una presión de $1 \mu\text{Pa}$, mientras que para el aire se utiliza una onda sonora con una presión de $20 \mu\text{Pa}$. Este valor en el aire se selecciona porque coincide con el umbral mínimo de audición de los adultos jóvenes en el rango de frecuencia en el que mejor escuchan (1 kHz a 3 kHz).

2. Densidades y velocidades del sonido: La intensidad de una onda sonora no solo depende de la presión, sino también de la densidad y la velocidad del sonido del medio en el que se propaga. Debido a que la densidad y la velocidad del sonido en el agua son mucho mayores que en el aire, dos ondas sonoras con la misma presión tendrán intensidades muy diferentes en estos medios.

Como resultado, las ondas sonoras con las mismas intensidades medidas en W/m^2 en el agua y en el aire tienen intensidades relativas que difieren en 61,5 dB. Esta diferencia debe restarse de los niveles sonoros en agua referenciados a $1 \mu\text{Pa}$ para obtener los niveles sonoros de las ondas en aire referenciadas a $20 \mu\text{Pa}$, que tienen la misma intensidad absoluta en W/m^2 . De los 61,5 dB de diferencia, 26 dB se deben a la diferencia en las presiones de referencia, mientras que los otros 35,5 dB se explican por las diferencias en densidades y velocidades del sonido. Una diferencia de 60 dB en intensidad relativa representa una diferencia de potencia de un millón de veces [5, 17].

Al comentar sobre niveles sonoros, es importante no solo decir “dB”, sino también añadir el nivel de referencia. Esto se suele escribir como “dB re $1 \mu\text{Pa}$ ” para sonidos en agua que se miden en relación (re) a $1 \mu\text{Pa}$ y “dB re $20 \mu\text{Pa}$ ” para sonidos en aire que se miden en relación (re) a $20 \mu\text{Pa}$. Lo mismo ocurre cuando se habla de la temperatura. No se debe decir simplemente: “Afuera hace 50”, porque eso significará algo diferente para alguien que viva en Estados Unidos, que utiliza la escala Fahrenheit, y para alguien que viva en Europa, que utiliza la escala Celsius. 50°F equivalen a 10°C , mientras que 50°C equivalen a 122°F , ¡Una diferencia abismal! Para que no haya confusión, se debe decir qué escala de temperatura se utiliza. Lo mismo ocurre con los dB, para evitar confusiones, se debe especificar el nivel de referencia.

Es interesante conocer los niveles sonoros aproximados de algunos sonidos comunes en el aire, como se muestran en la figura 4.2. Estos son todos relativos a la intensidad de una onda sonora en el aire con una presión de $20 \mu\text{Pa}$.



Figura 4.2: Niveles sonoros comunes en el aire. (Elaboración propia)

4.3. ¿CÓMO UTILIZAN LAS PERSONAS Y LOS ANIMALES EL SONIDO EN EL MAR?

Las personas y los animales marinos utilizan el sonido en el mar para llevar a cabo diversas tareas. A diferencia de la luz, que solo puede recorrer distancias cortas antes de ser absorbida o dispersada en el océano, el sonido puede propagarse a largas distancias. Por esta razón, los animales marinos dependen del sonido para realizar actividades fundamentales como buscar alimento, encontrar pareja, navegar y comunicarse.

En general, el sonido se utiliza de dos formas: de manera pasiva y activa. En la acústica pasiva, los organismos o usuarios no emiten sonidos propios, sino que escuchan los sonidos generados por otros animales, fenómenos naturales o personas. El océano, especialmente en entornos costeros, es un ambiente ruidoso. Al escuchar los sonidos, se puede obtener mucha información sobre el entorno marino.

La segunda forma de utilizar el sonido en el agua se conoce como acústica activa. En este caso, se crea un sonido mediante una fuente y se recibe con un receptor. Algunos sistemas de acústica activa, como los teléfonos subacuáticos, tienen una fuente y un receptor separados y ubicados en lugares diferentes (sonar biestático). Otros sistemas acústicos activos tienen la fuente y el receptor en el mismo lugar (sonar monostático). En este último caso, el sonido se emite desde la fuente,

rebota en un objeto y regresa al receptor, como se muestra en la ilustración de la figura 4.3. El sonido que vuelve al receptor se denomina eco o retrodispersión. Al analizar el sonido recibido, se puede obtener información detallada sobre el objeto, como su distancia, tamaño y composición.

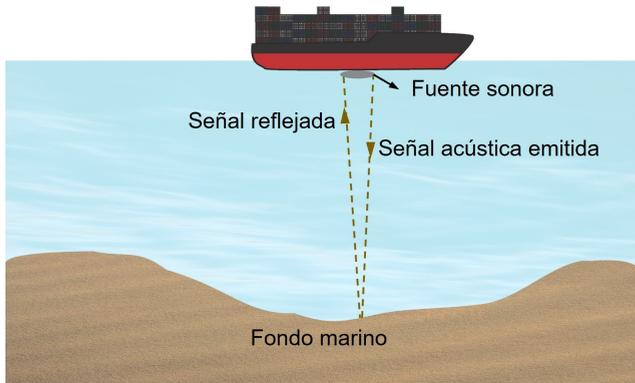


Figura 4.3: Las ecosondas calculan la profundidad del agua midiendo el tiempo que tarda la señal acústica en llegar al fondo y volver al barco (reflexión). (Elaboración propia)

Existen numerosos usos del sonido en el océano, tanto por parte de las personas como de los animales. El sonar [101] y la ecolocalización son ejemplos similares de cómo se utiliza el sonido. Las personas utilizan el sonar para explorar el océano, mientras que los animales utilizan la ecolocalización para encontrar comida e identificar objetos.

4.3.1. SONAR

Sonar (SOund Navigation And Ranging) es el nombre genérico de la tecnología que se utiliza para localizar objetos bajo el agua [18, 102, 103]. Existen dos tipos de sistemas sonar: activos y pasivos. En el sonar activo, el sistema emite un pulso de sonido y el operador escucha los ecos. En el sonar pasivo, el operador escucha los sonidos emitidos por el objeto que intenta detectar, identificar o localizar.

Sonar activo

Cuando se envía una señal sonora al agua, parte de ella se reflejará si choca con un objeto. La distancia al objeto puede calcularse midiendo el tiempo transcurrido entre la señal enviada y la recepción del sonido reflejado, o eco. Por ejemplo, si la fuente y el receptor se encuentran en el mismo lugar y transcurren cuatro segundos (4s) entre la emisión del sonido y el retorno de su eco, el sonido ha tardado 2s en viajar hasta el objeto y 2s en regresar. La velocidad media del sonido en el agua de mar es de 1500 m/s. Si el sonido tarda 2s en llegar al objeto, se calcula que el objeto está a 3000 m de distancia, dado que $distancia = c \cdot t$. El sonido puede reflejarse en cualquier objeto que se encuentre en el agua, como un submarino o el fondo del mar, donde el sonar puede utilizarse para determinar la profundidad del océano.

Los sistemas de sonar suelen utilizar haces de sonido muy directivos [104]. Al buscar objetos en el agua, estos haces ayudan a determinar la dirección hacia el objetivo, así como la distancia. Cabe mencionar que los técnicos de sonar experimentados, suelen ser capaces de distinguir entre los ecos producidos por un submarino, un afloramiento rocoso, un banco de peces o una ballena.

Sistemas de sonar pasivo

Las personas, los mamíferos marinos, los peces y los invertebrados pueden emitir sonidos bajo el agua, los cuales pueden ser utilizados para localizarlos mediante sistemas de sonar pasivo, de manera similar a cómo los humanos utilizan el oído para localizar a alguien que habla en una habitación. Los sistemas de sonar pasivo utilizados por las personas consisten en conjuntos de hidrófonos remolcados detrás de un barco o submarino, o en sistemas fijos de hidrófonos cableados a tierra o sujetos a un amarre.

4.3.2. Ecolocalización

Los mamíferos marinos utilizan el sonido para obtener información sobre su entorno y encontrar alimento. Una forma en que lo hacen es mediante la ecolocalización, donde producen sonidos o clics que se reflejan al golpear un objeto [105, 106]. La ecolocalización es crucial para estos animales, ya que les permite navegar y alimentarse en condiciones de oscuridad, aguas profundas o turbias donde la visibilidad es limitada.

Se sabe que las ballenas dentadas, incluyendo las belugas, los cachalotes, los delfines y las marsopas, utilizan la ecolocalización. Estas ballenas dentadas producen chasquidos de alta frecuencia, los cuales rebotan en objetos distantes y los ecos son recibidos por el animal que los generó. De esta manera, pueden determinar la distancia a la que se encuentra un objeto en función del tiempo que tarda en regresar el eco. Cuanto más lejos esté el objeto, mayor será el tiempo que tardará en regresar el eco. Los animales que utilizan la ecolocalización suelen esperar a escuchar el primer eco antes de emitir un segundo clic. Un ejemplo de esto se puede observar en la figura 4.4.

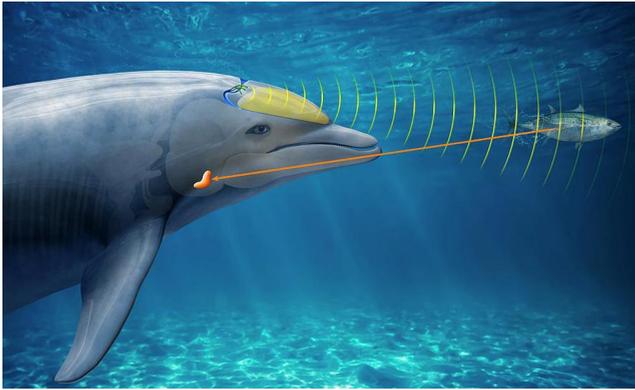


Figura 4.4: Un delfin utiliza la ecolocalización para localizar su presa (Fuente: alamy.es)

A medida que un animal ecolocalizador se acerca a su objetivo, la velocidad a la que produce los clics es cada vez mayor. La serie de chasquidos de ecolocalización que preceden al intento de captura de una presa se denomina tren de chasquidos. A medida que se acorta el intervalo entre los chasquidos, el tren de chasquidos empieza a sonar como un zumbido.

Los ecos devueltos suenan de forma diferente al clic original producido por el animal [106]. Las diferencias entre el sonido del chasquido original y el eco devuelto proporcionan al animal ecolocalizador información sobre el tamaño, la forma, la orientación, la dirección, la velocidad e incluso la composición del objeto. Los delfines tienen una capacidad asombrosa para detectar objetivos tan pequeños como una pelota de golf a casi un campo de fútbol de distancia. Esa distancia es mucho mayor de lo que un delfín puede ver bajo el agua. El haz de los clics de ecolocalización también es muy directivo y puede moverse con un ligero giro del cuerpo del animal.

4.4. ¿POR QUÉ LOS SONIDOS TIENEN DETERMINADAS PROPIEDADES?

Los sonidos submarinos generados por los animales marinos y las personas tienen características que dependen de los fines para los que vayan a utilizarse. Es importante comprender por qué se eligen determinados sonidos o señales para tareas específicas. Por ejemplo, ¿Por qué las señales de ecolocalización generadas por delfines y orcas difieren de los cantos de las ballenas jorobadas? ¿Por qué las señales utilizadas para localizar submarinos difieren de las utilizadas para las comunicaciones entre submarinistas?. Dos características importantes de una señal son su frecuencia y su duración.

4.4.1. Frecuencia

La distancia que debe recorrer el sonido es una de las consideraciones clave para determinar la frecuencia de la señal. Las señales de baja frecuencia se absorben menos en comparación con las altas frecuencias. Por lo tanto, pueden recorrer distancias más largas y seguir siendo detectadas. Por otra parte, el nivel de ruido ambiental de fondo es mayor a bajas frecuencias que a altas. Así pues, las señales de alta frecuencia pueden detectarse a niveles sonoros más bajos que las señales de baja frecuencia. Los efectos contrapuestos de la absorción y el ruido ambiental significan que existe una frecuencia óptima que maximiza las posibilidades de que la señal se oiga por encima del ruido ambiental. Esta frecuencia óptima depende de la distancia que recorre el sonido. Las ecosondas utilizadas para medir la profundidad del agua en el océano profundo, que se encuentra entre 4 a 5 km de profundidad, suelen utilizar frecuencias de unos 12 kHz. Las ecosondas utilizadas en aguas menos profundas suelen emplear frecuencias mucho más altas, a menudo de 30 kHz o más. Las señales diseñadas para viajar miles de kilómetros tienen que utilizar frecuencias muy bajas. Por ejemplo, el proyecto Acoustic Thermometry of Ocean Climate (ATOC) [107] transmite señales a 75 Hz.

Las señales utilizadas para determinar la estructura de la tierra bajo el lecho marino, como los sistemas de perfilado sísmico utilizados para localizar reservas de petróleo y gas, tienen que utilizar frecuencias muy bajas porque los sonidos de alta frecuencia se absorben aún más rápidamente en el lecho marino que en el océano.

Otra consideración a la hora de seleccionar la frecuencia es el tamaño del objetivo. Es el caso de las señales utilizadas para ecolocalizar, encontrar peces y obtener imágenes del fondo marino, así como para muchos otros fines. La longitud de onda del sonido debe ser pequeña en comparación con el tamaño del objetivo para proporcionar imágenes detalladas. Las señales de alta frecuencia, que tienen

longitudes de onda más pequeñas, ofrecen una mayor resolución y pueden captar mejor la estructura detallada del objetivo que las señales de baja frecuencia. Las señales de ecolocalización de los delfines mulares, por ejemplo, tienen frecuencias de 110 km a 130 km, con longitudes de onda de, aproximadamente 1 cm (0,5 pulgadas). Los buscadores de peces suelen funcionar a frecuencias de 26 kHz, con una longitud de onda de unos 6 cm (2,3 pulgadas). Los sonares de barrido lateral utilizan frecuencias de hasta 500 kHz, con una longitud de onda de 3 mm (0,1 pulgadas), para generar imágenes detalladas de objetos en el fondo marino.

4.4.2. Duración

Otra característica importante de la señal es su duración. Algunas señales, como las utilizadas para la ecolocalización [105], son muy cortas. Por ejemplo, los impulsos de ecolocalización transmitidos por los delfines mulares solo duran entre 50 y 80 μ s. Otras señales, como los cantos de las ballenas jorobadas, pueden durar horas.

Los impulsos de ecolocalización, al igual que los de sonares activos, son cortos por varias razones. Tanto la ecolocalización como los sonares activos funcionan transmitiendo un impulso y luego escuchando los ecos. Es imposible oír los ecos al mismo tiempo que se produce una transmisión, lo que significa que el pulso transmitido debe ser corto, para permitir que se oigan los ecos. Además, se necesitan mediciones precisas del tiempo de vuelo (ida y vuelta) desde la fuente al blanco y viceversa para determinar con exactitud la distancia al blanco. Los pulsos cortos proporcionan mediciones más precisas del tiempo de vuelo que los pulsos largos. Por último, los pulsos cortos permiten separar ecos muy próximos entre sí, lo que ocurre cuando hay varios blancos presentes.

Por otra parte, los cantos de las ballenas jorobadas (machos), sirven como llamadas de apareamiento. Es ventajoso para un macho cantar canciones largas cuando busca pareja, para que el mayor número posible de hembras escuchen la canción. Estos cantos representan una forma básica de comunicación. En términos más generales, las señales de comunicación, como las transmitidas por los buceadores, pueden durar mucho tiempo cuando es necesario transferir una gran cantidad de información.

A veces se utilizan señales especialmente diseñadas, complejas y de larga duración para mejorar la relación señal/ruido SNR¹[108] de la señal recibida, sin dejar de proporcionar mediciones precisas del tiempo de vuelo y permitiendo separar los ecos.

¹Del inglés: Signal-to-Noise Ratio

5. TEMAS AVANZADOS SOBRE EL SONIDO

Sumergiéndonos en conceptos más avanzados, estudiaremos temas fundamentales relacionados con el sonido. En la sección 5.1, comenzaremos por comprender qué es la intensidad del sonido, un parámetro que nos permite cuantificar la energía que transporta una onda y su nivel de potencia. En la sección 5.2, nos adentraremos en el mundo de los decibeles, una unidad de medida ampliamente utilizada en acústica para expresar la intensidad relativa del sonido. En este contexto, descubriremos qué es un dB y cómo se relaciona con la escala logarítmica. En la sección 5.3, explicaremos el concepto de fase, y cómo afecta a la calidad y característica del sonido. Además, en la sección 5.4, abordaremos las pérdidas básicas por transmisión, profundizando en las pérdidas geométricas. Por último, en la sección 5.5, comentaremos los posibles errores que pueden surgir en la medición del sonido y cómo pueden influir en la precisión de los resultados. Con el estudio de estos temas avanzados sobre el sonido, el lector podrá adquirir un conocimiento más profundo y amplio sobre la naturaleza de la ciencia del sonido en el mar.

5.1. ¿QUÉ ES LA INTENSIDAD?

Las ondas sonoras se caracterizan por la compresión y expansión del medio a medida que la energía sonora se propaga. Esto representa el componente de presión del sonido. Al mismo tiempo, las partículas que componen el medio experimentan un movimiento de vaivén [1, 17].

La intensidad de una onda sonora se define como la cantidad de energía transmitida a través de una unidad de superficie por unidad de tiempo en la dirección en la que viaja la onda sonora. La energía transmitida por una onda sonora está compuesta tanto por componentes de presión (energía potencial debida a la impedancia acústica) como de velocidad de las partículas (energía cinética debida al movimiento de las partículas). Por tanto, la intensidad del sonido es igual a la media del producto de la presión acústica por la velocidad de las partículas. Para una onda plana de amplitud (ver figura 5.1), se obtiene la I en W/m^2 presentada en la Ecuación 5.1:

$$\vec{I} = p \vec{u} \quad (5.1)$$

Donde \vec{I} es la intensidad, p es la presión acústica y \vec{u} es la velocidad de la partícula.

La flecha sobre el término de la velocidad de las partículas indica que esta es una magnitud vectorial, es decir, que tiene dirección y sentido. El movimiento de las partículas en una onda sonora generalmente se alinea con la dirección en la que viaja la onda. En cambio, la presión no tiene una dirección asociada.

La relación entre la presión acústica p y la velocidad asociada de las partículas en un medio \vec{u} se denomina impedancia acústica específica Z_o [109].

Ahora bien, para las ondas planas que se propagan en la dirección $+x$, la impedancia característica del medio está dada por la Ecuación 5.2:

$$Z_o = \rho_o c \quad (5.2)$$

Donde la densidad ρ_o y la velocidad del sonido c son características del medio, como el agua o el aire. Para el aire a temperatura y presión estándar, la impedancia característica es $Z_o = \rho_o c = 415 \text{ Pa s}/\text{m}$. Para el agua dulce a 20°C y 1 atm, la impedancia característica es $Z_o = \rho_o c = 1,48 \times 10^6 \text{ Pa s}/\text{m}$. Estas cifras indican que el agua y el aire tienen impedancias muy diferentes, lo que altera la relación entre intensidad, presión y velocidad de las partículas para una onda sonora dentro de cada medio.

Con la Ecuación 5.2, la velocidad de las partículas para una onda plana puede escribirse como una función de la presión, la densidad y la velocidad del sonido, como se observa en la Ecuación 5.3:

$$|\vec{u}| = \frac{p}{\rho c} \quad (5.3)$$

donde la intensidad \vec{I} de una onda plana depende, por tanto, no solo de la presión p , sino también de la densidad ρ y de la velocidad del sonido c del medio a través del cual viaja, (ver Ecuación 5.4).

$$|\vec{I}| = \frac{p^2}{\rho c} \quad (5.4)$$

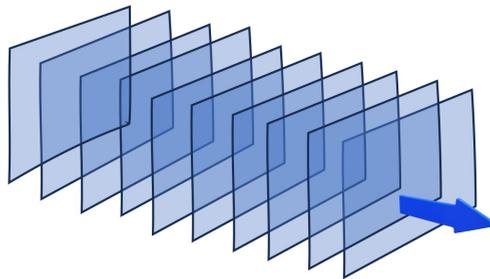


Figura 5.1: Ilustración de una onda plana. Los rectángulos representan los frentes de onda que viajan en un espacio tridimensional. (Elaboración propia)

Dicho de otra manera, una onda plana en el aire tiene una velocidad de partícula mayor que una onda de sonido de presión equivalente que se propaga a través del agua. Esto se debe a que la menor densidad del aire permite una aceleración más rápida. Por lo tanto, aunque ambas ondas tienen la misma presión, la mayor velocidad de las partículas en la onda del aire resulta en una mayor intensidad [109].

Como se comentó en el Capítulo 3, el dispositivo más común para medir el sonido bajo el agua es un hidrófono. Los hidrófonos miden la presión (amplitud) de una onda de sonido en lugar de su intensidad, ya que no son sensibles a la velocidad de las partículas. Por lo tanto, el nivel de intensidad del sonido se calcula a partir de la presión del sonido medida, utilizando la relación entre la magnitud de la intensidad y la presión.

5.2. INTRODUCCIÓN A LOS DECIBELES

5.2.1. ¿Qué es un dB?

Una vez definido el concepto de intensidad, se puede decir que la cantidad de energía por unidad de tiempo se denomina *potencia*, y la *intensidad* es la cantidad de potencia transmitida a través de una unidad de área en una dirección específica. La potencia se mide en vatios W y la intensidad en vatios por metro cuadrado W/m^2 [110-112]. Debido a la amplia gama de valores acústicos, como la presión o la energía, estos suelen cuantificarse en una escala logarítmica y se expresan en decibels dB. Aunque la unidad inicial es el bel, nombrado así en honor a Alexander Graham Bell, inventor del teléfono, rara vez se utiliza, ya que el oído humano es muy sensible y puede detectar cambios de tan solo 1/10 de 1 bel, es decir, un decibel.

El decibel se define como una relación logarítmica de la proporción entre dos potencias, por ejemplo, $10 \log_{10}(P_1/P_2)$, y una diferencia de 10 dB significa que P_1 es 10 veces superior a P_2 . Es importante señalar que el decibel es una unidad relativa, no absoluta.

Además, el decibel también puede adaptarse a otros valores, como la presión acústica. Dado que la potencia P_i es proporcional al cuadrado de la presión p_i^2 , la misma relación se puede expresar como:

$$10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{p_1^2}{p_2^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \quad (5.5)$$

Se debe tener en cuenta que, se utiliza $10 \log_{10}(A_1/A_2)$ para cantidades similares a las energías (intensidad, potencia) y $20 \log_{10}(a_1/a_2)$ para cantidades similares a la presión acústica.

Es necesario establecer un nivel de referencia estándar si se desea proporcionar niveles absolutos de presión o intensidad en decibelios dB. Por lo tanto, es fundamental que los niveles sonoros expresados en dB incluyan la presión de referencia p_{ref} . Se ha acordado arbitrariamente utilizar la intensidad de una onda de sonido con una presión de $1 \mu Pa$ como, la intensidad de referencia para el sonido bajo el agua. En el caso del aire, sin embargo, se utiliza una intensidad de referencia más alta, de $20 \mu Pa$. Por lo tanto, los niveles de sonido expresados en dB en el agua no son equivalentes a los niveles de sonido en el aire.

$$p_{(dB)} = 20 \log_{10} \frac{p_{sonido}}{p_{ref}} \quad (5.6)$$

La naturaleza logarítmica de esta escala significa que cada aumento de 10 dB es un aumento de diez veces en la potencia acústica. Un aumento de 20 dB es entonces un aumento de potencia de 100 veces, y un aumento de 30 dB es un aumento de potencia de 1000 veces. Sin embargo, un aumento de diez veces en la potencia acústica no significa que el sonido se perciba diez veces más alto. Los humanos perciben un aumento de 10 dB en el nivel de sonido como solo el doble de la intensidad del sonido, y una disminución de 10 dB en el nivel de sonido como una reducción a la mitad de la intensidad del sonido.

5.3. INTRODUCCIÓN A LA FASE

5.3.1. ¿Qué es la fase?

Una característica importante de una onda de sonido es su fase. Esta característica especifica la ubicación o el tiempo de un punto dentro de un ciclo de onda de una forma de onda repetitiva. Por lo general, es la diferencia de fase entre las ondas sonoras lo que resulta relevante, en lugar de las fases absolutas reales de las señales. Al sumar dos ondas sonoras, es importante conocer la diferencia de fase entre ellas para determinar la forma de onda resultante.

La diferencia de fase entre dos ondas de la misma frecuencia que pasan por una ubicación fija se determina por la diferencia de tiempo entre las mismas posiciones dentro de los ciclos de onda de los dos sonidos (por ejemplo, los picos o los cruces por cero positivos), expresada como una fracción de un ciclo de onda. Esto se ilustra en la figura 5.2.

Cuando dos ondas de sonido de la misma frecuencia están perfectamente alineadas, no existe diferencia de fase y se dice que están "en fase". En este caso, se suman para producir una onda sonora con una amplitud igual a la suma de las amplitudes de las dos ondas. A este proceso se le conoce como "interferencia constructiva", como se muestra en el ejemplo de la figura 5.3.

Si una de las dos ondas sonoras de la misma frecuencia se desplaza medio ciclo en relación con la otra, de manera que una onda se encuentra en su amplitud máxima, mientras que la otra está en su amplitud mínima, se dice que las ondas sonoras están "desfasadas", como se muestra en la figura 5.4. Cuando dos on-

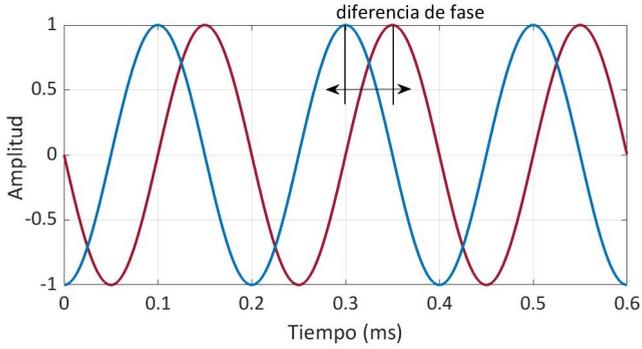


Figura 5.2: Ejemplo de diferencia de fase entre dos ondas de sonido de la misma frecuencia. (Elaboración propia)

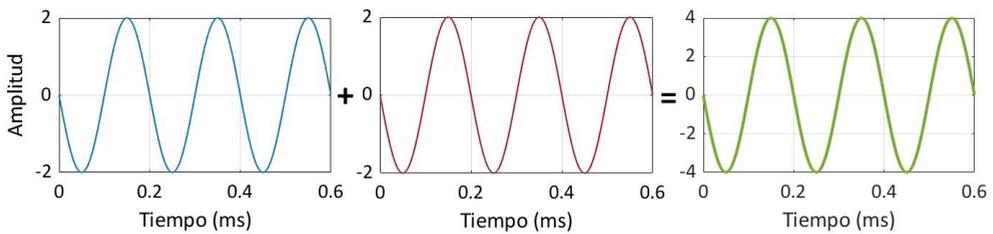


Figura 5.3: Ejemplo de interferencia constructiva de una onda. Dos ondas que están en fase se suman y producen una onda con mayor amplitud. (Elaboración propia)

das están desfasadas, se cancelan exactamente cuando se suman. Este principio se utiliza en auriculares con cancelación de ruido [113, 114], y se conoce como “interferencia destructiva”. Tanto la interferencia constructiva como la destructiva explican muchas propiedades del sonido en el océano [115].

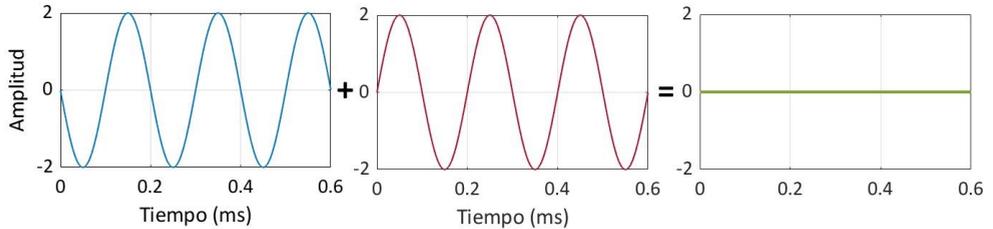


Figura 5.4: Ejemplo de interferencia destructiva de una onda. Dos ondas que están en desfase se cancelan. (Elaboración propia)

Una diferencia de fase normalmente se expresa en términos de un ángulo, en lugar de una fracción de un ciclo de onda. La diferencia de fase se puede describir como un ángulo porque la forma de onda de un tono puro que consta de una sola frecuencia se puede representar con la función seno trigonométrica (por lo que se denomina “onda sinusoidal”):

$$y(t) = A \cdot \sin(2\pi ft) \tag{5.7}$$

donde $y(t)$ es la forma de onda, A es la amplitud, f es la frecuencia (ciclos/segundos) y t es el tiempo en segundos. En esta ecuación el argumento de la función $\sin(2\pi ft)$ es un ángulo expresado en radianes, con $\pi = 3.14159 \dots$. La onda seno es periódica, consiste en ciclos de onda que se repiten en el tiempo, como se muestra en la figura 5.5.

Los valores de $\sin(2\pi ft)$ en función del tiempo durante un ciclo completo se presentan en la tabla 5.1.

Por lo tanto, las ubicaciones en un ciclo de onda se pueden especificar como un ángulo en radianes o grados, así como en fracciones de un ciclo. Esto se puede visualizar con una rueda giratoria y un radio trazando la onda sinusoidal.

La mayoría de los sonidos son mucho más complejos que una sola frecuencia y consisten en muchas ondas sinusoidales diferentes en distintas fases. Cuando varias ondas sinusoidales se combinan para crear un sonido, las formas de onda de todas ellas se combinan en cada punto a lo largo de la forma de onda resultante.

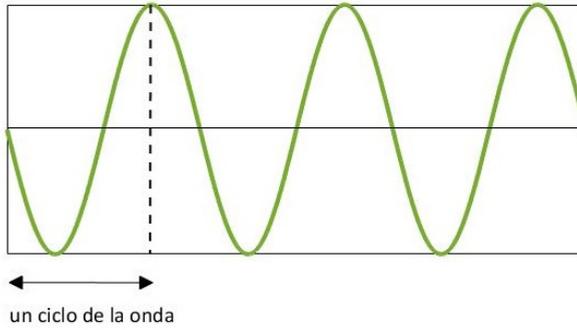


Figura 5.5: Ejemplo de una onda sinusoidal con ciclos que se repiten en el tiempo. (Elaboración propia)

Tabla 5.1: Valores de una onda sinusoidal en función del tiempo durante un ciclo completo

Ciclo de onda	Tiempo (s)	Radianes ($2\pi ft$)	Grados($2\pi ft$)	$\sin(2\pi ft)$
0	0	0	0	0
1/4	$1/(4f)$	$\pi/2$	90°C	1
1/2	$1/(2f)$	π	180°C	0
3/4	$3/(4f)$	$3\pi/2$	270°C	-1
1	$1/f$	2π	360°C	0

Cualquier sonido puede describirse completamente mediante la amplitud y la fase de cada componente de onda sinusoidal en cada frecuencia. En la mayoría de los programas computacionales que modelan la propagación de un sonido específico en el océano, se debe calcular cómo se alteran tanto la amplitud como la fase de cada componente de frecuencia a medida que viaja.

La fase de un sonido varía no solo con el tiempo, sino también con el espacio [1, 64]. Una descripción completa de un tono de sonido de propagación unidimensional debe tener en cuenta tanto el momento en que se produce la medición como la posición del receptor, tal como se expresa a continuación.

$$y(t) = A \cdot \sin(2\pi ft - 2\pi x/\lambda) \quad (5.8)$$

donde x es la ubicación del receptor a lo largo de un eje de medición y λ representa la longitud de onda del tono. Por lo tanto, el mismo sonido medido en dos lugares diferentes al mismo tiempo también mostrará una diferencia de fase. Se utilizan fórmulas similares para describir cómo varía la fase de un sonido en el espacio tridimensional.

Los arreglos de hidrófonos (arrays) utilizan las diferencias relativas en las fases de la señal recibida en dos o más receptores ubicados en diferentes posiciones (pero al mismo tiempo) para determinar la dirección de la fuente de las señales. Este proceso se conoce como formación de haces. Por otro lado, los conjuntos de proyectores aprovechan la diferencia en las fases de las señales transmitidas por dos o más proyectores para controlar la dirección en la que el sonido es más intenso.

5.4. PÉRDIDAS BÁSICAS POR TRANSMISIÓN

Cuando las ondas acústicas se propagan, generalmente experimentan una pérdida evidente de intensidad debido a la *dispersión geométrica* (efecto de divergencia) y a la *absorción* de energía acústica por parte del medio en el que se propagan (como se menciona en la (sección 2.2). Esta pérdida de propagación, también conocida como pérdida por transmisión TL , es un parámetro crucial en los sistemas acústicos, ya que limita la amplitud de la señal recibida y, por lo tanto, el rendimiento de los sistemas receptores utilizados en acústica submarina. Esto tiene un impacto directo en la relación señal/ruido [116, 117].

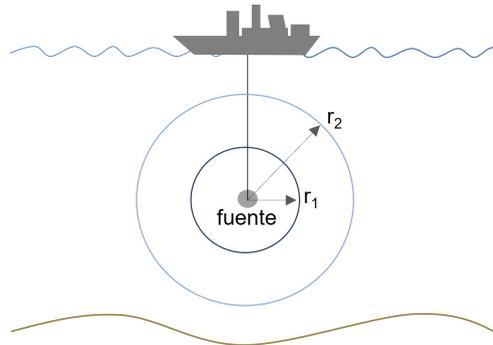


Figura 5.6: Ilustración de dispersión esférica. (Elaboración propia)

5.4.1. Pérdidas geométricas por dispersión

Cuando una onda acústica se propaga desde una fuente sonora, su energía se dispersa sobre una superficie cada vez mayor. Dado que la energía se conserva, la intensidad disminuirá de manera proporcional a la inversa de dicha superficie. A este proceso se le conoce como *pérdidas geométricas por dispersión*. Esta dispersión está asociada a la dirección de la fuente, así como a los efectos del medio, como la focalización, las zonas de convergencia y las superficies límites del medio (superficie y fondo marino).

Entre las pérdidas geométricas, se tiene la dispersión esférica y cilíndrica, que son dos aproximaciones simples que se utilizan para describir cómo disminuye el nivel del sonido a medida que una onda se propaga alejándose de una fuente.

Dispersión esférica

El caso más simple ocurre en un medio homogéneo e infinito, con una fuente de dimensiones pequeñas que emite en todas las direcciones (una fuente puntual). En este caso, la energía transmitida se conserva, pero se propaga en forma de esferas de radio cada vez mayor, como se observa en la figura 5.6.

La disminución de la intensidad acústica entre dos puntos r_1 y r_2 será inversamente proporcional a la relación de las superficies de las esferas.

La velocidad a la que disminuye la intensidad para la dispersión esférica se puede obtener utilizando la definición de intensidad y el principio de conservación de la

energía. Si la potencia acústica generada por la fuente se irradia por igual en todas las direcciones, debe distribuirse de manera uniforme entre la superficie de cualquier esfera que rodee la fuente. Por lo tanto, la potencia total $P_{T,esf}$ es igual a la intensidad multiplicada por el área de la esfera (ver Ecuación 5.9):

$$P_{T,esf} = 4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2 \quad (5.9)$$

$$TL_{esf} = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_2} \right) = 10 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \quad (5.10)$$

donde r es el radio de la esfera e I es la intensidad.

La intensidad del sonido disminuye con el cuadrado de la distancia. Sea r_1 igual a 1 m. La cantidad por la cual la intensidad disminuye en relación con su nivel en la fuente se denomina pérdidas por transmisión TL_{esf} y generalmente se expresa en decibeles:

$$TL_{esf} = 10 \log \left(\frac{r_2}{r_{1m}} \right)^2 = 20 \log(r_2) \text{ (dB)} \quad (5.11)$$

Dispersión cilíndrica

El sonido no puede propagarse uniformemente en todas las direcciones desde una fuente en el océano de forma indefinida. A medida que el sonido se aleja de la fuente, eventualmente alcanzará la superficie o el fondo del mar. Se puede obtener una aproximación simple para la pérdida de dispersión en un medio con límites superior e inferior al suponer que el sonido se distribuye uniformemente sobre la superficie de un cilindro con un radio igual al rango r y una altura H igual a la profundidad del océano, como se muestra en la figura 5.7).

La potencia total que atraviesa un cilindro $P_{T,cil}$ (ver Ecuación 5.12), que rodea la fuente, es igual a la intensidad por el área del cilindro. Si el radio del cilindro es $r_o = 1\text{m}$, la pérdida de transmisión en decibeles se expresa como sigue, en la Ecuación 5.13.

$$P_{T,cil} = 2\pi r_1 H I_1 = 2\pi r_2 H I_2 \quad (5.12)$$

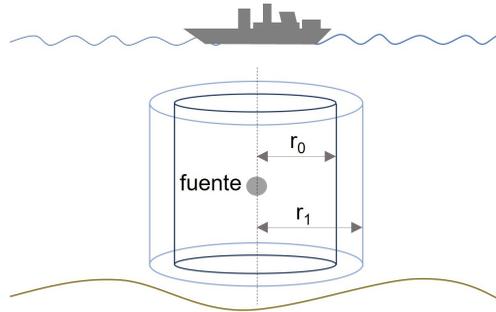


Figura 5.7: Ilustración de dispersión cilíndrica. (Elaboración propia)

$$TL_{cil} = 10 \log(r) \quad (5.13)$$

5.4.2. Pérdidas por dispersión en el océano

Tanto la dispersión esférica como la cilíndrica son solo aproximaciones a las pérdidas por dispersión real en el océano. Ningún tipo de propagación tiene en cuenta la refracción que se produce debido a la dependencia de la velocidad del sonido con la profundidad. Se han desarrollado métodos mucho más sofisticados para predecir el campo de sonido alrededor de una fuente acústica, teniendo en cuenta el campo de velocidad del sonido real en el océano y los reflejos de la superficie del mar y el fondo del mar a medida que el sonido se aleja de una fuente [118, 119]. No obstante, la dispersión esférica y cilíndrica se utiliza a menudo para obtener una estimación de los niveles de sonido alrededor de una fuente sin realizar cálculos informáticos complejos.

5.5. ERRORES DE MEDICIÓN

Para comprender los efectos de los errores de medición, se considera el ejemplo de determinar la velocidad del sonido en el agua de mar a una temperatura, salinidad y presión particulares. Esto requiere mediciones precisas de la distancia entre la fuente de sonido y el receptor, el tiempo que tarda el sonido en viajar desde la fuente hasta el receptor, y la temperatura, salinidad y presión del agua de mar a través de la cual viaja el sonido. Aunque solo hay un valor verdadero para la velocidad del sonido a una temperatura, salinidad y presión dadas, dos mediciones casi siempre

arrojarán valores diferentes de velocidad del sonido debido a las imprecisiones en estas. Si las medidas se repiten muchas veces, se obtendrá un rango de valores para la velocidad del sonido a una temperatura, salinidad y presión específicas.

En los primeros experimentos para determinar la velocidad del sonido, como el realizado por Colladon y Sturm en 1826, las medidas no eran muy precisas. El valor que hallaron para la velocidad del sonido en el lago de Ginebra, Suiza, a una temperatura de 8°C fue de 1435 m/s, que es aproximadamente 4 m/s más lento que el valor moderno para el agua dulce a 8°C y la presión atmosférica (1439,07 m/s). Si la medición se hubiera repetido 100 veces, los errores habrían llevado a un rango de valores para la velocidad del sonido, quizás similar al rango que se muestra en el histograma de la figura 5.8. Cada barra vertical de la figura, muestra el número de veces que la velocidad del sonido medida cae dentro de un rango de 1 m/s. La barra vertical de 1435 m/s [120], (donde está la flecha) muestra que el valor medido cayó entre 1434,5 a 1435,5 m/s, siete veces en este conjunto particular de 100 mediciones simuladas.

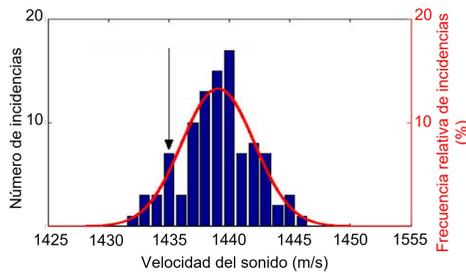


Figura 5.8: Histograma que muestra el número de veces (eje Y, izquierdo) que la velocidad del sonido medida podría haber caído dentro de intervalos de 1 m/s si el experimento de Colladon y Sturm se repitiera 100 veces. Si las mediciones se repitieran muchas más veces, el histograma acabaría aproximándose a la curva roja que muestra la frecuencia relativa de aparición en porcentaje (eje Y, derecho) con la que se observarían las velocidades del sonido especificadas en el eje X para las incertidumbres en las mediciones.(Fuente: [120])

La estadística más básica que los científicos calculan para ayudar a interpretar múltiples mediciones es el valor medio [121]. En el ejemplo anterior, la media de 100 mediciones proporciona una mejor estimación de la velocidad real del sonido que cualquier medida individual. La media (indicada por el símbolo m) de un conjunto de mediciones se define como la suma de todas las medidas (indicadas por los símbolos x_1, x_2, \dots, x_n) dividida por el número de mediciones (indicado por el símbolo n):

$$m = \frac{(X_1 + X_2 + \dots + X_n)}{n} \quad (5.14)$$

El valor medio de la Ecuación 5.14 de las 100 medidas anteriores de la figura 5.8 es de 1439,09 m/s, muy próximo al valor “verdadero” de 1439,07 m/s.

La siguiente estadística que los científicos calculan para ayudar a interpretar múltiples mediciones es una medida de la variabilidad. La desviación típica, que suele indicarse con la letra griega sigma σ , es una medida de la dispersión de la distribución en torno a la media. Se calcula restando la media de cada una de las mediciones para obtener las diferencias entre las mediciones y la media. A continuación, se calculan los cuadrados de las diferencias, se suman todas las diferencias al cuadrado y se dividen por uno menos que el número total de mediciones n . Este cálculo proporciona una estimación de la varianza de la distribución cuando se dispone de n medidas. La raíz cuadrada de la varianza es la desviación típica [122, 123]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_1 - m)^2 + (X_2 - m)^2 + \dots + (X_n - m)^2}{(n - 1)}} \quad (5.15)$$

La desviación típica de las 100 mediciones indicadas es de 3,10 m/s. En este caso, la desviación típica refleja una estimación de la incertidumbre en las mediciones de Colladon y Sturm que se utilizó para construir el histograma [124].

El valor medio calculado a partir de un conjunto específico de mediciones es solo una estimación de la media “verdadera”. Para conocer la incertidumbre estadística de esta estimación. Los científicos podrían preguntarse lo siguiente: ¿Cuál es la precisión de la estimación de la velocidad del sonido en agua dulce a 8°C y presión atmosférica calculada a partir de las 100 mediciones del ejemplo simulado anterior? La incertidumbre en la estimación del valor medio no es más que la desviación típica de las mediciones σ dividida por la raíz cuadrada del número de mediciones n . La desviación típica de la media, que se escribe como σ_m , se muestra en la Ecuación 5.16.

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5.16)$$

La desviación típica de la media suele denominarse también error típico de la media. Para el caso mostrado anteriormente, la desviación típica de la media es:

$$\sigma_m = \frac{3.10}{\sqrt{100}} = 0,31 \text{ m/s} \quad (5.17)$$

La desviación típica de la media especifica la incertidumbre estadística de la estimación de la media, debida a la exactitud y precisión limitadas de las mediciones. Este conjunto de mediciones simuladas da el valor de la velocidad del sonido en agua dulce a 8°C y presión atmosférica como $1439,09 \pm 0,31 \text{ m/s}$. Esto significa que es probable que el valor real de la media se sitúe dentro de un intervalo de valores de 0,31 m/s por encima o por debajo de la media calculada de 1439,09 m/s.

Los experimentos modernos en los que se mide la velocidad del sonido en el laboratorio son mucho más precisos que el experimento que Colladon y Sturm realizaron en el lago Lemán, pero las mediciones siguen sin ser perfectas. El valor "verdadero" moderno también es incierto y se escribe más correctamente como $1439,07 \pm 0,05 \text{ m/s}$.

Bibliografía

- [1] Lawrence E. Kinsler y col. *Fundamentals of acoustics*. John Wiley & Sons, 2000 (vid. págs. 17, 20, 30, 36, 67, 75, 83).
- [2] Federico Miyara. *Acústica y sistemas de sonido*. Universidad Nacional de Rosario, 2010. ISBN: 978-950-673-557-9 (vid. págs. 18, 59).
- [3] Thomas D. Rossing. *Handbook of acoustics*. Springer, 2014 (vid. pág. 18).
- [4] Heinrich Kuttruff. *Acoustics: an introduction*. CRC Press, 2007 (vid. pág. 20).
- [5] Heinrich Kuttruff. *Ultrasonics: Fundamentals and applications*. Springer Science & Business Media, 2012 (vid. págs. 21, 67, 68).
- [6] D. Covalt Dunning. "Warning sounds of moths". En: *Zeitschrift für Tierpsychologie* 25.2 (1968), págs. 129-138 (vid. pág. 22).
- [7] Thomas D. Rossing, Junehee Yoo y Andrew Morrison. "Acoustics of percussion instruments: An update". En: *Acoustical science and technology* 25.6 (2004), págs. 406-412 (vid. pág. 22).
- [8] Robert K. Gould y col. "Measured Structure of Harmonics Self-Generated in an Acoustic Beam". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 40.2 (1966), págs. 421-427. DOI: 10.1121/1.1910090 (vid. pág. 23).
- [9] María Campo-Valera y col. "Acoustic Parametric Signal Generation for Underwater Communication". En: *Sensors* 18.7 (jul. de 2018), pág. 2149. DOI: 10.3390/s18072149 (vid. pág. 23).

- [10] María Campo-Valera, Ivan Felis-Enguix e Isidro Villó-Pérez. "Signal Processing for Parametric Acoustic Sources Applied to Underwater Communication". En: *Sensors* 20.20 (2020), pág. 5878. DOI: 10.3390/s20205878 (vid. pág. 23).
- [11] Miguel Ardid y col. "Underwater Communication Using Acoustic Parametric Arrays". En: *The 4th International Electronic Conference on Sensors and Applications*. MDPI, nov. de 2017. DOI: 10.3390/ecsa-4-04907 (vid. pág. 23).
- [12] Mark F. Hamilton y David T. Blackstock. "On the coefficient of nonlinearity in nonlinear acoustics". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 83.1 (1988), págs. 74-77. DOI: 10.1121/1.396187 (vid. pág. 23).
- [13] Bengt O. Enflo y Claes M. Hedberg. *Theory of nonlinear acoustics in fluids*. Vol. 67. Springer Science & Business Media, 2006 (vid. pág. 24).
- [14] Herman Medwin, Clarence S. Clay y Timothy K. Stanton. "Fundamentals of Acoustical Oceanography". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 105.4 (1999), págs. 2065-2066. DOI: 10.1121/1.426950 (vid. págs. 24, 25, 34, 40).
- [15] Robert J. Urick. *Principles of underwater sound*. Vol. 22, 3rd edition. Peninsula Publishing, 1983. ISBN: 0-932146-62-7 (vid. págs. 24, 26, 37, 40).
- [16] Yuan Gao y col. "Effects of underwater explosion depth on shock wave overpressure and energy". En: *Physics of Fluids* 34.3 (2022). DOI: 10.1063/5.0081107 (vid. pág. 24).
- [17] Xavier Lurton. *An introduction to underwater acoustics: principles and applications*. Springer Science & Business Media, 2002 (vid. págs. 26, 33, 37, 41-44, 68, 75).
- [18] Jens M. Hovem. "Underwater acoustics: Propagation, devices and systems". En: *Journal of Electroceramics* 19.4 (2007), págs. 339-347. DOI: 10.1007/s10832-007-9059-9 (vid. págs. 28, 32, 70).

- [19] Leonid Maksimovich Brekhovskikh, Yu P. Lysanov y Jurij P. Lysanov. *Fundamentals of ocean acoustics*. Springer Science & Business Media, 2003 (vid. págs. 28, 33, 36, 37).
- [20] Jens M. Hovem. *Marine acoustics: The physics of sound in underwater environments*. Peninsula publishing Los Altos, California, 2012 (vid. pág. 28).
- [21] Dajun Sun y col. "Sound velocity correction based on effective sound velocity for underwater acoustic positioning systems". En: *Applied Acoustics* 151 (2019), págs. 55-62. DOI: 10.1016/j.apacoust.2019.02.027 (vid. págs. 28, 41).
- [22] George S. K. Wong y Shi-ming Zhu. "Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature, and pressure". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 97.3 (1995), págs. 1732-1736. DOI: 10.1121/1.413048 (vid. pág. 29).
- [23] Chen Chen-Tung y Millero Frank J. "Speed of sound in seawater at high pressures". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 62.5 (1977), págs. 1129-1135. DOI: 10.1121/1.381646 (vid. págs. 30, 41).
- [24] D. Srinivasan, K. R. G. Murthy y G. R. K. Murty. "Underwater sound scattering model of the topographic features of the sea floor". En: *Defence Science Journal* 32.1 (1982), págs. 1-8 (vid. págs. 30, 35).
- [25] R. E. Francois y G. R. Garrison. "Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 72.3 (1982), págs. 896-907. DOI: 10.1121/1.388170 (vid. pág. 31).
- [26] R. E. Francois y G. R. Garrison. "Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 72.6 (1982), págs. 1879-1890. DOI: 10.1121/1.388673 (vid. pág. 31).
- [27] F. H. Fisher y Simmons V. P. "Sound absorption in sea water". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 62.3 (1977), págs. 558-564. DOI: 10.1121/1.381574 (vid. pág. 31).

- [28] Henry E. Bass y col. "Atmospheric absorption of sound: Further developments". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 97.1 (1995), págs. 680-683. DOI: 10.1121/1.412989 (vid. pág. 31).
- [29] Domingo Pardo-Quiles y col. "Analyzing multiple acoustic diffraction over a wide barrier using equivalent knife-edge geometries and Babinet's principle (L)". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 153.4 (abr. de 2023), págs. 1974-1978. DOI: 10.1121/10.0017722 (vid. pág. 32).
- [30] Tom S. Garrison. *Oceanography: an invitation to marine science*. Cengage Learning, 2012 (vid. pág. 35).
- [31] Jian Li y col. "A Combined Ray Tracing Method for Improving the Precision of the USBL Positioning System in Smart Ocean". En: *Sensors* 18.10 (2018), pág. 3586. DOI: 10.3390/s18103586 (vid. pág. 34).
- [32] Alba López-Segovia y col. "Exploring the Validity of Plane and Spherical Millimeter-Wave Incidences for Multiple-Diffraction Calculations in Wireless Communication Systems". En: *Electronics* 12.9 (abr. de 2023), pág. 2020. DOI: 10.3390/electronics12092020 (vid. pág. 35).
- [33] Tom S. Garrison. *Oceanography: an invitation to marine science*. Cengage Learning, 2012. ISBN: 1305105168 (vid. pág. 36).
- [34] Ji-Xun Zhou y col. "Sea surface effect on shallow-water reverberation". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 121.1 (2007), págs. 98-107. DOI: 10.1121/1.2400623 (vid. pág. 37).
- [35] D. Michael Milder. "Ray and Wave Invariants for SOFAR Channel Propagation". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 46.5B (1969), págs. 1259-1263. DOI: 10.1121/1.1911850 (vid. pág. 37).
- [36] Maurice Ewing y J. Lamar Worzel. "LONG-RANGE SOUND TRANSMISSION". En: *Geological Society of America Memoirs*. Geological Society of America, 1948, págs. 1-32. DOI: 10.1130/mem27-3-p1 (vid. pág. 39).
- [37] Maurice Ewing and J. L. Worzel, N. C. Steenland y Frank Press. "GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS IN THE EMERGED AND SUBMERGED ATLANTIC COASTAL PLAIN". En: *Geological Society of America Bulletin* 61.9

- (1950), pág. 877. DOI: 10.1130/0016-7606(1950)61[877:giitea]2.0.co;2 (vid. pág. 39).
- [38] John Lamar Worzel, Maurice Ewing y Chaim Leib Pekeris. *Propagation of Sound in the Ocean*. Vol. 27. Geological Society of America, 1948 (vid. pág. 39).
- [39] D. C. Webb y M. J. Tucker. "Transmission Characteristics of the SOFAR Channel". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 48.3B (1970), págs. 767-769. DOI: 10.1121/1.1912201 (vid. págs. 39, 43).
- [40] William C. Cummings y Paul O. Thompson. "Characteristics and seasons of blue and finback whale sounds along the U.S. west coast as recorded at SOSUS stations". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 95.5 (1994), págs. 2853-2853. DOI: 10.1121/1.409514 (vid. pág. 39).
- [41] Christopher G. Fox y col. "Acoustic detection of a seafloor spreading episode on the Juan de Fuca Ridge using military hydrophone arrays". En: *Geophysical Research Letters* 22.2 (1995), págs. 131-134. DOI: 10.1029/94gl02059 (vid. pág. 40).
- [42] T. Rossby, D. Dorson y J. Fontaine. "The RAFOS System". En: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 3.4 (1986), págs. 672-679. DOI: 10.1175/1520-0426(1986)003<0672:trs>2.0.co;2 (vid. pág. 40).
- [43] Curtis A. Collins y col. "Looping RAFOS floats in the California Current System". En: *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 85 (2013), págs. 42-61. DOI: 10.1016/j.dsr2.2012.07.027 (vid. pág. 40).
- [44] P. L. Richardson y S. L. Garzoli. "Characteristics of intermediate water flow in the Benguela current as measured with RAFOS floats". En: *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 50.1 (2003), págs. 87-118. DOI: 10.1016/s0967-0645(02)00380-6 (vid. pág. 40).
- [45] Walter Munk, P. F. J. O. Worcester y Carl Wunsch. "Ocean acoustic tomography". En: *Markus Jochum et Raghu Murtugudde, editores, Physical Oceanography* (1995), pág. 119 (vid. págs. 41-46).

- [46] D. E. Weston. "Propagation of sound in shallow water". En: *Radio and Electronic Engineer* 26.4 (1963), pág. 329. DOI: 10.1049/ree.1963.0151 (vid. pág. 42).
- [47] D. Blokhintzev. "The Propagation of Sound in an Inhomogeneous and Moving Medium I". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 18.2 (1946), págs. 322-328. DOI: 10.1121/1.1916368 (vid. págs. 42, 44).
- [48] L. N. Liebermann. "The Origin of Sound Absorption in Water and in Sea Water". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 20.6 (1948), págs. 868-873. DOI: 10.1121/1.1906450 (vid. pág. 42).
- [49] David M. F. Chapman y Peter D. Ward. "The normal-mode theory of air-to-water sound transmission in the ocean". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 87.2 (1990), págs. 601-618. DOI: 10.1121/1.398929 (vid. pág. 47).
- [50] David M.F. Chapman, DJ Thomson y Dale D. Ellis. "Modeling air-to-water sound transmission using standard numerical codes of underwater acoustics". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 91.4 (1992), págs. 1904-1910. DOI: 10.1121/1.403701 (vid. pág. 47).
- [51] Peter F. Worcester y Walter H. Munk. "Sound transmission through a fluctuating ocean (1979) and ocean acoustic tomography (1995): An intertwined history." En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 126.4 (2009), pág. 2157. DOI: 10.1121/1.3248383 (vid. pág. 47).
- [52] Victor W. Sparrow. "Sonic boom wave propagation from air into water: Implications for marine mammals". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 94.3 (1993), págs. 1850-1851. DOI: 10.1121/1.407693 (vid. pág. 48).
- [53] Ryunosuke Kikuchi. "Risk formulation for the sonic effects of offshore wind farms on fish in the EU region". En: *Marine Pollution Bulletin* 60.2 (2010), págs. 172-177. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2009.09.023 (vid. pág. 48).
- [54] Charles H. Sherman y John L. Butler. *Transducers and arrays for underwater sound*. Vol. 4. Springer, 2007 (vid. pág. 52).

- [55] María Campo-Valera y col. "Characterization of a Piezoelectric Acoustic Sensor Fabricated for Low-Frequency Applications: A Comparative Study of Three Methods". En: *Sensors* 23.5 (2023), pág. 2742 (vid. pág. 52).
- [56] María Mercedes Campo Valera y col. "Simulación y diseño de un sensor acústico piezoeléctrico para detección de partículas". En: *Tecniacústica 2017: 48º Congreso Español de Acústica; Encuentro Ibérico de Acústica; European Symposium on Underwater Acoustics Applications; European Symposium on Sustainable Building Acoustics: A Coruña 3-6 Octubre 2017*. Sociedad Española de Acústica. 2017, págs. 1457-1465. ISBN: 978-84-87985-29-4 (vid. pág. 52).
- [57] María Mercedes Campo Valera y col. "Estudio del efecto paramétrico en agua con aplicación a un calibrador acústico para detección de neutrinos". En: *Tecniacústica 2017: 48º Congreso Español de Acústica; Encuentro Ibérico de Acústica; European Symposium on Underwater Acoustics Applications; European Symposium on Sustainable Building Acoustics: A Coruña 3-6 Octubre 2017*. Sociedad Española de Acústica. 2017, págs. 1466-1472. ISBN: ISBN 978-84-87985-29-4 (vid. pág. 52).
- [58] William R. Thayer. "Leonardo da Vinci as a Pioneer in Science". En: *The Monist* (1894) (vid. pág. 52).
- [59] Jairo Alejandro Martínez Rodríguez, Jaime Vitola Oyaga y Susana Del Pilar Sandoval Cantor. "Fundamentos teórico-prácticos del ultrasonido". En: *Tecnura* 10.20 (2007), págs. 4-18 (vid. pág. 52).
- [60] Jaffe Hans. "Piezoelectric Ceramics". En: *Journal of the American Ceramic Society* 41.11 (1958), págs. 494-498. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1958.tb12903.x (vid. pág. 52).
- [61] Valeriy Sharapov. *Piezoceramic Sensors*. Springer Berlin Heidelberg, 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-15311-2 (vid. pág. 52).
- [62] T.J. Lewis. "The piezoelectric effect". En: *CEIDP'05. 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005*. IEEE. 2005, págs. 717-720 (vid. pág. 52).

- [63] M. Martins y col. "Optimization of piezoelectric ultrasound emitter transducers for underwater communications". En: *Sensors and Actuators A: Physical* 184 (2012), págs. 141-148. DOI: 10.1016/j.sna.2012.06.008 (vid. pág. 53).
- [64] Antonio Arnau. *Piezoelectric transducers and applications*. Vol. 2004. Springer, 2004 (vid. págs. 53, 83).
- [65] R. Raisutis y L. Mazeika. "The simulation of ultrasonic imaging in the case of the objects with a complex geometry". En: *Ultragarsas/Ultrasound* 38.1 (2001), págs. 46-53 (vid. pág. 53).
- [66] Ana María Jaramillo. *Acústica: la ciencia del sonido*. Fondo Editorial ITM, 2007 (vid. pág. 55).
- [67] Darlene R. Ketten. "Marine mammal auditory systems: a summary of audiometric and anatomical data and its implications for underwater acoustic impacts". En: (1998) (vid. pág. 56).
- [68] Brandon M. Casper, Phillip S. Lobel y Hong Y. Yan. "The Hearing Sensitivity of the Little Skate, *Raja erinacea*: A Comparison of Two Methods". En: *Environmental Biology of Fishes* 68.4 (2003), págs. 371-379. DOI: 10.1023/b:ebfi.0000005750.93268.e4 (vid. pág. 56).
- [69] Dorian S. Houser y James J. Finneran. "Variation in the hearing sensitivity of a dolphin population determined through the use of evoked potential audiometry". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 120.6 (2006), págs. 4090-4099. DOI: 10.1121/1.2357993 (vid. pág. 56).
- [70] Ronald A. Kastelein y col. "Underwater detection of tonal signals between 0.125 and 100kHz by harbor seals (*Phoca vitulina*)". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 125.2 (2009), págs. 1222-1229. DOI: 10.1121/1.3050283 (vid. pág. 56).
- [71] P. E. Nachtigall y col. "Shipboard measurements of the hearing of the white-beaked dolphin *Lagenorhynchus albirostris*". En: *Journal of Experimental Biology* 211.4 (2008), págs. 642-647. DOI: 10.1242/jeb.014118 (vid. pág. 56).

- [72] Susan E. Parks y col. "Anatomical predictions of hearing in the North Atlantic right whale". En: *The Anatomical Record: Advances in Integrative Anatomy and Evolutionary Biology* 290.6 (2007), págs. 734-744. DOI: 10.1002/ar.20527 (vid. pág. 56).
- [73] Vladimir V. Popov y col. "Audiogram Variability in Normal Bottlenose Dolphins (*Tursiops truncatus*)". En: *Aquatic Mammals* 33.1 (2007), págs. 24-33. DOI: 10.1578/am.33.1.2007.24 (vid. pág. 56).
- [74] Brian C. J. Moore, Brian R. Glasberg y Thomas Baer. "A model for the prediction of thresholds, loudness, and partial loudness". En: *Journal of the Audio Engineering Society* 45.4 (1997), págs. 224-240 (vid. pág. 56).
- [75] Jesús Mariano Merino y Loida Muñoz-Repiso. "La percepción acústica: física de la audición". En: *Revista de ciencias* 2 (2013), págs. 19-26 (vid. págs. 57, 58).
- [76] Arthur N. Popper, Anthony D. Hawkins y Frank Thomsen. "Taking the Animals' Perspective Regarding Anthropogenic Underwater Sound". En: *Trends in Ecology & Evolution* 35.9 (2020), págs. 787-794. DOI: 10.1016/j.tree.2020.05.002 (vid. pág. 62).
- [77] María Mercedes Campo-Valera. "Técnicas acústicas no lineales para las comunicaciones submarinas". Tesis doct. Universidad Politecnica de Cartagena (Spain), 2020 (vid. pág. 62).
- [78] Gordon M. Wenz. "Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources". En: *The journal of the acoustical society of America* 34.12 (1962), págs. 1936-1956 (vid. pág. 63).
- [79] Lázaro Redondo y Antonio Ruiz Mateo. "Ruido subacuático: fundamentos, fuentes, cálculo y umbrales de contaminación ambiental". En: *Revista Digital del Cedex* 186 (2017) (vid. pág. 64).
- [80] Marie-Noël R. Matthews y col. "A Modeling Comparison of the Potential Effects on Marine Mammals from Sounds Produced by Marine Vibroseis and Air Gun Seismic Sources". En: *Journal of Marine Science and Engineering* 9.1 (2020), pág. 12. DOI: 10.3390/jmse9010012 (vid. pág. 64).

- [81] Qiulong Yang y col. "Spatial Vertical Directionality and Correlation of Low-Frequency Ambient Noise in Deep Ocean Direct-Arrival Zones". En: *Sensors* 18.2 (2018), pág. 319. DOI: 10.3390/s18020319 (vid. pág. 64).
- [82] Raffaella Falkner y col. "The Acoustic Repertoire of Bottlenose Dolphins (*Tursiops truncatus*) in the Cres-Lošinj Archipelago (Croatia): Site Dependent Diel and Seasonal Changes". En: *Diversity* 15.6 (2023), pág. 787. DOI: 10.3390/d15060787 (vid. pág. 65).
- [83] Bertel Møhl y col. "The monopulsed nature of sperm whale clicks". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 114.2 (2003), págs. 1143-1154. DOI: 0.1121/1.1586258 (vid. pág. 66).
- [84] Walter M.X. Zimmer y col. "Three-dimensional beam pattern of regular sperm whale clicks confirms bent-horn hypothesis". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 117.3 (2005), págs. 1473-1485. DOI: 10.1121/1.1828501 (vid. pág. 66).
- [85] V. Kandia e Y. Stylianou. "Detection of sperm whale clicks based on the Teager Kaiser energy operator". En: *Applied Acoustics* 67 (2006), págs. 1144-1163. DOI: 10.1016/j.apacoust.2006.05.007 (vid. pág. 66).
- [86] Kenneth S. Norris y col. *The Hawaiian spinner dolphin*. Univ of California Press, 1994 (vid. pág. 66).
- [87] W. John Richardson y col. *Marine mammals and noise*. Academic press, 2013 (vid. pág. 66).
- [88] Meghan G. Aulich y col. "Fin whale (*Balaenoptera physalus*) migration in Australian waters using passive acoustic monitoring". En: *Scientific reports* 9.1 (2019), pág. 8840 (vid. pág. 66).
- [89] Peggy L. Edds. "Vocalizations of the blue whale, *Balaenoptera musculus*, in the St. Lawrence River". En: *Journal of Mammalogy* 63.2 (1982), págs. 345-347 (vid. pág. 66).
- [90] Ana Sirovic, John A. Hildebrand y Deborah Thiele. "Baleen whale spatial patterns in the Scotia Sea during January and February 2003". En: *Journal*

- of Cetacean Reserch and Management* 8.2 (2006), págs. 161-171 (vid. pág. 66).
- [91] Y. Hiyoshi y col. "The difference in the low frequency sound propagation across the North Pacific sound communication in various species of baleen whales". En: *Oceans' 04 MTS/IEEE Techno-Ocean'04 (IEEE Cat. No. 04CH37600)*. Vol. 4. IEEE. 2004, págs. 2308-2315 (vid. pág. 66).
- [92] Aaron N. Rice y col. "Potential Bryde's whale (*Balaenoptera edeni*) calls recorded in the northern Gulf of Mexico". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 135.5 (2014), págs. 3066-3076. DOI: 10.1121/1.4870057 (vid. pág. 66).
- [93] Jenny A. Allen y col. "Network analysis reveals underlying syntactic features in a vocally learnt mammalian display, humpback whale song". En: *Proceedings of the Royal Society B* 286.1917 (2019), pág. 20192014. DOI: 10.1098/rspb.2019.2014 (vid. pág. 66).
- [94] Julia R. G. Dombroski y col. "Animal-borne tags provide insights into the acoustic communication of southern right whales (*Eubalaena australis*) on the calving grounds". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 147.6 (2020), EL498-EL503. DOI: 10.1121/10.0001391 (vid. pág. 66).
- [95] T. A. Webster y col. "Temporal variation in the vocal behaviour of southern right whales in the Auckland Islands, New Zealand". En: *Royal Society Open Science* 6.3 (2019), pág. 181487. DOI: 10.1098/rsos.181487 (vid. pág. 66).
- [96] Francesca Budillon y col. "The Anthropogenic Footprint of Physical Harm on the Seabed of Augusta Bay (Western Ionian Sea) A Geophysical Investigation". En: *Journal of Marine Science and Engineering* 10.11 (2022), pág. 1737. DOI: 10.3390/jmse10111737 (vid. pág. 66).
- [97] Paige E. Stevens, Veda Allen y Jason N. Bruck. "A Quieter Ocean: Experimentally Derived Differences in Attentive Responses of *Tursiops truncatus* to Anthropogenic Noise Playbacks before and during the COVID-19-Related Anthropause". En: *Animals* 13.7 (2023), pág. 1269. DOI: 10.3390/ani13071269 (vid. pág. 66).

- [98] Rosalyn Luisa Putland y Allen F. Mensinger. "The effect of sound produced by vessel passage at a navigational lock on freshwater fishes". En: *Proceedings of Meetings on Acoustics*. Vol. 37. 1. Acoustical Society of America. 2019, pág. 070004. DOI: 10.1121/2.0001113 (vid. pág. 67).
- [99] Leo Chiu-Leung. "Simplification of full spectrum soundscape analysis using specific frequencies". En: *2023 IEEE Underwater Technology (UT)*. IEEE. 2023, págs. 1-6. DOI: 10.1109/UT49729.2023.10103408 (vid. pág. 67).
- [100] Arthur N. Popper y Anthony D. Hawkins. "An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes". En: *Journal of fish biology* 94.5 (2019), págs. 692-713 (vid. pág. 67).
- [101] María Campo-Valera e Ivan Felis. "Underwater Acoustic Communication for The Marine Environment's Monitoring". En: *The 6th International Electronic Conference on Sensors and Applications*. MDPI, nov. de 2019. DOI: 10.3390/ecsa-6-06642 (vid. pág. 70).
- [102] Libin Du y col. "Research on High Robustness Underwater Target Estimation Method Based on Variational Sparse Bayesian Inference". En: *Remote Sensing* 15.13 (2023), pág. 3222. DOI: 10.3390/rs15133222 (vid. pág. 70).
- [103] Zhiwei Yang y col. "A Side-Scan Sonar Image Synthesis Method Based on a Diffusion Model". En: *Journal of Marine Science and Engineering* 11.6 (2023), pág. 1103. DOI: 10.3390/jmse11061103 (vid. pág. 70).
- [104] Ivan Felis-Enguix y col. "Practical Aspects of Acoustic Leaky-Wave Antennas Applied to Underwater Direction Finding". En: *7th International Electronic Conference on Sensors and Applications*. MDPI, nov. de 2020. DOI: 10.3390/ecsa-7-08218 (vid. pág. 71).
- [105] Lasse Jakobsen, Signe Brinkløv y Annemarie Surlykke. "Intensity and directionality of bat echolocation signals". En: *Frontiers in physiology* 4 (2013), pág. 89 (vid. págs. 71, 74).
- [106] Sofie M. Van Parijs, Christian Lydersen y Kit M. Kovacs. "Sounds produced by individual white whales, *Delphinapterus leucas*, from Svalbard during

- capture (L)". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 113.1 (2003), págs. 57-60 (vid. págs. 71, 72).
- [107] Brian D. Dushaw y col. "A decade of acoustic thermometry in the North Pacific Ocean". En: *Journal of Geophysical Research: Oceans* 114.C7 (2009) (vid. pág. 73).
- [108] P. Arumbu y S. Srinivasalu. "Sustainable model for high signal to noise ratio to measure underwater acoustic signal using Acoustic Doppler Velocimeter". En: *Computers & Electrical Engineering* 68 (2018), págs. 262-270 (vid. pág. 74).
- [109] Lincoln Gray PhD. "Properties of sound". En: *Journal of Perinatology* 20.1 (2000), S6-S11. DOI: 10.1038/sj.jp.7200442 (vid. págs. 76, 77).
- [110] Himanshu Yadava. *The Berkeley DB Book*. Apress, 2007 (vid. pág. 78).
- [111] Finn Jacobsen y Hans-Elias de Bree. "A comparison of two different sound intensity measurement principles". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 118.3 (2005), págs. 1510-1517. DOI: 10.1121/1.1984860 (vid. pág. 78).
- [112] Frank Fahy. *Sound intensity*. CRC Press, 2017 (vid. pág. 78).
- [113] Brett R. C. Molesworth, Marion Burgess y Daniel Kwon. "The use of noise cancelling headphones to improve concurrent task performance in a noisy environment". En: *Applied Acoustics* 74.1 (2013), págs. 110-115. DOI: 10.1016/j.apacoust.2012.06.015 (vid. pág. 81).
- [114] Feng Niu, Xiaojun Qiu y Dong Zhang. "Effects of active noise cancelling headphones on speech recognition". En: *Applied Acoustics* 165 (2020), pág. 107335. DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107335 (vid. pág. 81).
- [115] Kevin Coussore y Guifang Li. "Phase and amplitude regeneration of differential phase-shift keyed signals using phase-sensitive amplification". En: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 14.3 (2008), págs. 648-658 (vid. pág. 81).

- [116] Andrew C. Singer, Jill K. Nelson y Suleyman S. Kozat. "Signal processing for underwater acoustic communications". En: *IEEE Communications Magazine* 47.1 (2009), págs. 90-96. DOI: 10.1109/MCOM.2009.4752683 (vid. pág. 83).
- [117] Paul C. Etter. *Underwater acoustic modeling and simulation*. CRC press, 2018. ISBN: 9781138054929 (vid. pág. 83).
- [118] Wenbo Wang, Desen Yang y Jie Shi. "A prediction method for acoustic intensity vector field of elastic structure in shallow water waveguide". En: *Shock and Vibration* 2020 (2020), págs. 1-23. DOI: 10.1155/2020/5389719 (vid. pág. 86).
- [119] Danielle T. Lynd y Ryan L. Harne. "Strategies to predict radiated sound fields from foldable, Miura-ori-based transducers for acoustic beamfolding". En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 141.1 (2017), págs. 480-489. DOI: 10.1121/1.4974204 (vid. pág. 86).
- [120] M. M. D. Colladon y Charles Sturm. *Mémoire sur La compersion des liquides*. Springer, 2009 (vid. pág. 87).
- [121] Michael Salinger. "Standard errors in event studies". En: *Journal of Financial and Quantitative Analysis* 27.1 (1992), págs. 39-53. DOI: 10.2307/2331297 (vid. pág. 87).
- [122] Pedro Cervantes-Hernández. "Media, varianza y desviación estándar". En: *Ciencia y Mar* 12.34 (2008), págs. 29-36 (vid. pág. 88).
- [123] Mariano Ruiz Espejo. "Estimación de la desviación estándar". En: *Estadística española* 59.192 (2017), págs. 37-44 (vid. pág. 88).
- [124] Fernando Quevedo Ricardi. "Medidas de tendencia central y dispersión". En: *Revista Biomédica Revisada Por Pares* (2011), págs. 1-8. DOI: 10.5867/medwave.2011.03.4934 (vid. pág. 88).