



Guía de buenas prácticas para la medición de sonido submarino



Con el apoyo de:



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO
MINISTERIO
DE LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



Fundación Biodiversidad



Guía de buenas prácticas para la medición de sonido submarino

Título: Guía de buenas prácticas para la medición de sonido submarino.

Autores: Marta Sánchez, Eduardo Madrid, Ivan Felis y Rosa Martínez.

Entidad: Centro Tecnológico Naval y del Mar (CTN).

Colabora: Ramón Miralles Ricós. Instituto de Telecomunicación y Aplicaciones Multimedia (UPV-iTEAM).

Año: 2020.

Con el apoyo de: Fundación Biodiversidad, del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Este guía de buenas prácticas Sánchez, M; Madrid, E; Felis, I; Martínez, R.

tiene que ser citada como: (2020) Guía de buenas prácticas para la medición de sonido submarino. Fundación Biodiversidad y CTN.

Datos de contacto: Centro Tecnológico Naval y del Mar – PTFA, Ctra. El Estrecho-Lobosillo, km 2 - 30320 Murcia.

T. 968 197 521
contact@ctnaval.com
www.ctnaval.com

Introducción



La Directiva marco sobre la estrategia marina (Directiva 2008/56/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de junio de 2008. “MSFD” de sus siglas en inglés Marine Strategy Framework Directive) exige a los Estados miembros desarrollar estrategias para conseguir o mantener el Buen Estado Ambiental (BEA) en los mares europeos.

Entre los 11 descriptores que describen de forma cualitativa el BEA se encuentra el “Descriptor 11: La introducción de energía, incluido el ruido subacuático, se sitúa en niveles que no afectan de manera adversa al medio marino” y está relacionado con presiones que derivan del aporte de sonido antropogénico y del aporte de otras formas de energía.

Los criterios que deberán utilizar los Estados miembros para determinar el buen estado ambiental de sus aguas marinas, así como las normas metodológicas aplicables, las especificaciones y métodos normalizados de seguimiento y evaluación se establecen en la Decisión (UE) 2017/848 de la Comisión, de 17 de mayo de 2017. En el caso del Descriptor 11 se definen dos criterios primarios:

- **D11C1:** La distribución espacial, la extensión temporal y los niveles de las fuentes de sonido impulsivo antropogénico no superan los niveles que puedan afectar adversamente a las poblaciones de animales marinos.
- **D11C2:** La distribución espacial, la extensión temporal y los niveles de sonido continuo antropogénico de baja frecuencia no superan los niveles que puedan afectar adversamente a las poblaciones de animales marinos.

Las estrategias marinas incluyen programas de seguimiento de cada uno de los descriptores que permiten evaluar el estado de las aguas marinas de forma permanente y esos criterios y normas metodológicas garantizan la coherencia y la comparabilidad entre las regiones o subregiones marinas de las evaluaciones del grado de consecución del buen estado ambiental.



Con el apoyo de:



GOBIERNO DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA CUARTA DEL GOBIERNO
MINISTERIO PRIMA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO



Fundación Biodiversidad



Abordar la medición y el seguimiento del sonido submarino es una tarea técnicamente compleja y la falta de estándares comunes aplicables a todos los aspectos que engloba este proceso dificulta en la mayoría de los casos garantizar la calidad de los resultados. Para facilitar la coherencia y comparabilidad de los programas de seguimiento y por tanto de la evaluación del estado de las aguas respecto al ruido submarino, se han desarrollado diferentes guías metodológicas en el marco de la implementación de la directiva a nivel internacional, bien a través del grupo técnico sobre ruido para la estrategia de implementación común de la Unión Europea (TG Noise) o de proyectos europeos financiados para apoyar la implementación de esta directiva, como el proyecto QUIETMED¹.

Para facilitar la medición y el seguimiento del sonido submarino y garantizar el cumplimiento de unos requisitos mínimos de calidad técnica, la presente guía recoge las recomendaciones, requerimientos y especificaciones técnicas relacionadas con el seguimiento del descriptor 11: sonido submarino para facilitar la correcta implementación de la directiva. Esta guía está dirigida a administraciones competentes, personal técnico, comunidad científica y cualquier otro colectivo que se enfrente a la necesidad de abordar la medición y el análisis de sonido submarino en el contexto de la Directiva marco sobre la estrategia marina.

El término ruido submarino hace referencia a aquellos niveles de sonido de origen artificial que producen o pueden producir efectos adversos sobre la biodiversidad y los ecosistemas marinos. Esta guía aborda la medición de sonido submarino con independencia de sus posibles repercusiones, pero se utilizan ambos términos indistintamente para facilitar la lectura.

Esta guía se estructura en los siguientes bloques temáticos:

1. Marco regulatorio y estándares internacionales de interés.
2. Instrumentación y despliegues.
3. Calibración.
4. Procesado.
5. Modelización.
4. Caso práctico: proyecto QUIETMED.
5. Referencias.

1- <http://www.quietmed-project.eu/>



Con el apoyo de:



GOBIERNO DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA CUARTA DEL GOBIERNO
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO



Contenido

1. Marco regulatorio y estándares internacionales de interés	6
2. Elementos de un sistema de monitorización acústica pasiva	8
2.1. Hidrófono	9
2.2. Electrónica de acondicionamiento de la señal	10
2.3. Conversor analógico digital	10
2.4. Almacenamiento de datos	11
2.5. Recomendaciones	11
3. Metodología para la medida de sonido antropogénico en el agua	13
3.1 Metodología para la medida de sonido continuo en el agua	13
3.2 Medida de sonido impulsivo en el agua	15
4. Sistemas de medición acústica	19
4.1. Sistemas a la deriva (boyas)	20
4.2. Sistemas fondeados (fondeos)	20
4.3. Sistemas basados en superficie	20
4.4. Sistemas basados en tierra	21
4.5. Otros sistemas	21
4.6. Recomendaciones y buenas prácticas	22
5. Calibración de hidrófonos	23
5.1. Técnicas de calibración	24
6. Procesado	30
6.1. Pre-procesado	31
6.2. Procesado	35
6.3. Obtención de los indicadores de ruido	36
6.4. Representación de los datos	36
7. Modelización	41
7.1. Modelos de propagación acústica submarina	42
7.2. Mapas de sonido	49
7.3. Ruido por tráfico marítimo	50
7.4. Validación con medidas in-situ	51
8. Proyecto QUIETMED	52
9. Referencias	53



Con el apoyo de:



GOBIERNO DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA CUARTA DEL GOBIERNO
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO



1. Marco regulatorio y estándares internacionales de interés

Tanto en el ámbito europeo como nacional, la legislación sobre ruido submarino se encuentra en una etapa inicial pero sí existen ya instrumentos internacionales y medidas legislativas a nivel nacional específicas sobre esta materia:

La Directiva 2008/56/CE, de 17 de junio de 2008, por la que se establece un marco de acción comunitaria para la política del medio marino (Directiva marco sobre la estrategia marina) es la principal referencia legislativa a nivel comunitario.

La Directiva marco sobre estrategia marina se modificó mediante la Directiva (UE) 2017/845 de la Comisión de 17 de mayo de 2017 por la que se modifica la Directiva 2008/56/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que se refiere a las listas indicativas de elementos que deben tomarse en consideración a la hora de elaborar estrategias marinas.

Para su desarrollo, la Comisión Europea aprobó la Decisión (UE) 2017/848 de la Comisión, de 17 de mayo de 2017, por la que se establecen los criterios y las normas metodológicas aplicables al buen estado medioambiental de las aguas marinas, así como especificaciones y métodos normalizados de seguimiento y evaluación, y por la que se deroga la Decisión 2010/477/UE.

La transposición de dicha directiva al sistema normativo español se recoge en la Ley 41/2010, de 29 de diciembre, de Protección del Medio Marino y en el Real Decreto 957/2018, de 27 de julio, por el que se modifica el anexo I de la Ley 41/2010, de 29 de diciembre, de protección del medio marino.

Por último, el Real Decreto 79/2019, de 22 de febrero, por el que se regula el informe de compatibilidad y se establecen los criterios de compatibilidad con las estrategias marinas desarrolla el procedimiento de tramitación de los informes de compatibilidad que ha de emitir el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico con motivo de la aprobación, autorización, modificación, renovación o prórroga de actividades en el medio marino y establece los criterios de compatibilidad de las actividades señaladas en el artículo 3.3 de la Ley de Protección del Medio Marino con las estrategias marinas.

Aunque el marco regulatorio sobre ruido submarino se encuentra en desarrollo, sí existen numerosas recomendaciones y estándares promovidas desde diferentes entidades como:

ISO: International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

IEC: International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, New Jersey, USA.

ANSI: American National Standards Institute, Washington DC, USA.

DIN: Deutsches Institut für Normung, Berlin, Germany.

Estas normas estandarizadas se resumen a continuación:

The International Organisation for Standardization (ISO) (www.iso.org)

- **ISO 17208-1:** Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships – Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes. Published: March 2016.
- **ISO 17208-2:** Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships – Part 2: Determination of source levels from deep water measurements. Published: June 2019.
- **ISO 17208-3:** Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships – Part 3: Requirements for shallow water measurements. Under development.
- **ISO 18405:** Underwater Acoustics – Terminology. Published: April 2017.
- **ISO 18406:** Underwater acoustics – Measurement of radiated underwater sound from percussive pile driving. Published: April 2017.

International Electrotechnical Commission (IEC) (www.iec.ch)

- **IEC 60500:** Underwater acoustics – Hydrophones – Properties of hydrophones in the frequency range 1 Hz to 500 kHz. Published April 2017.
- **IEC 60565-1:** Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones – Part 1: Procedures for free-field calibration of hydrophones. Published April 2020.
- **IEC 60565-2:** Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones – Part 2: Part 2: Procedures for low frequency pressure calibration. Published October 2019.
- **IEC 60050-8-1-32:** International Electrotechnical Vocabulary Part 32. Under revision. Likely publication date: November 2020.
- **IEC 63305:** Underwater acoustics – Calibration of acoustic wave vector receivers. Under development. Likely publication date: 2022.
- **IEC 62600-40 - Marine Energy; wave, tidal and other water current converters – Part 40:** acoustic characterization of marine energy converters (wave and tidal stream energy devices). Scope covers methodologies for measurement of radiated acoustic noise. Technical Specification. Publication date: 2019.

ISO/IEC Joint Technical Committee (JTC)

- **ISO/IEC 30140-1:2018 Information technology** – Underwater acoustic sensor network (UWASN). Part 1: Overview and requirements.
- **ISO/IEC 30140-2:2017 Information technology** – Underwater acoustic sensor network (UWASN). Part 2: Reference architecture.
- **ISO/IEC 30140-3:2018 Information technology** – Underwater acoustic sensor network (UWASN). Part 3: Entities and interface.
- **ISO/IEC 30140-4:2018 Information technology** – Underwater acoustic sensor network (UWASN). Part 4: Interoperability.

2. Elementos de un sistema de monitorización acústica pasiva

Se llama sistema de monitorización acústica pasiva (PAM) al conjunto de instrumentación electrónica capaz de obtener información acústica del entorno, de forma generalmente autónoma y, como su nombre indica, de forma pasiva, esto es, sin emitir sonidos en su funcionamiento (a diferencia de un SONAR², por ejemplo).

Un sistema de monitorización se compone de los siguientes elementos:

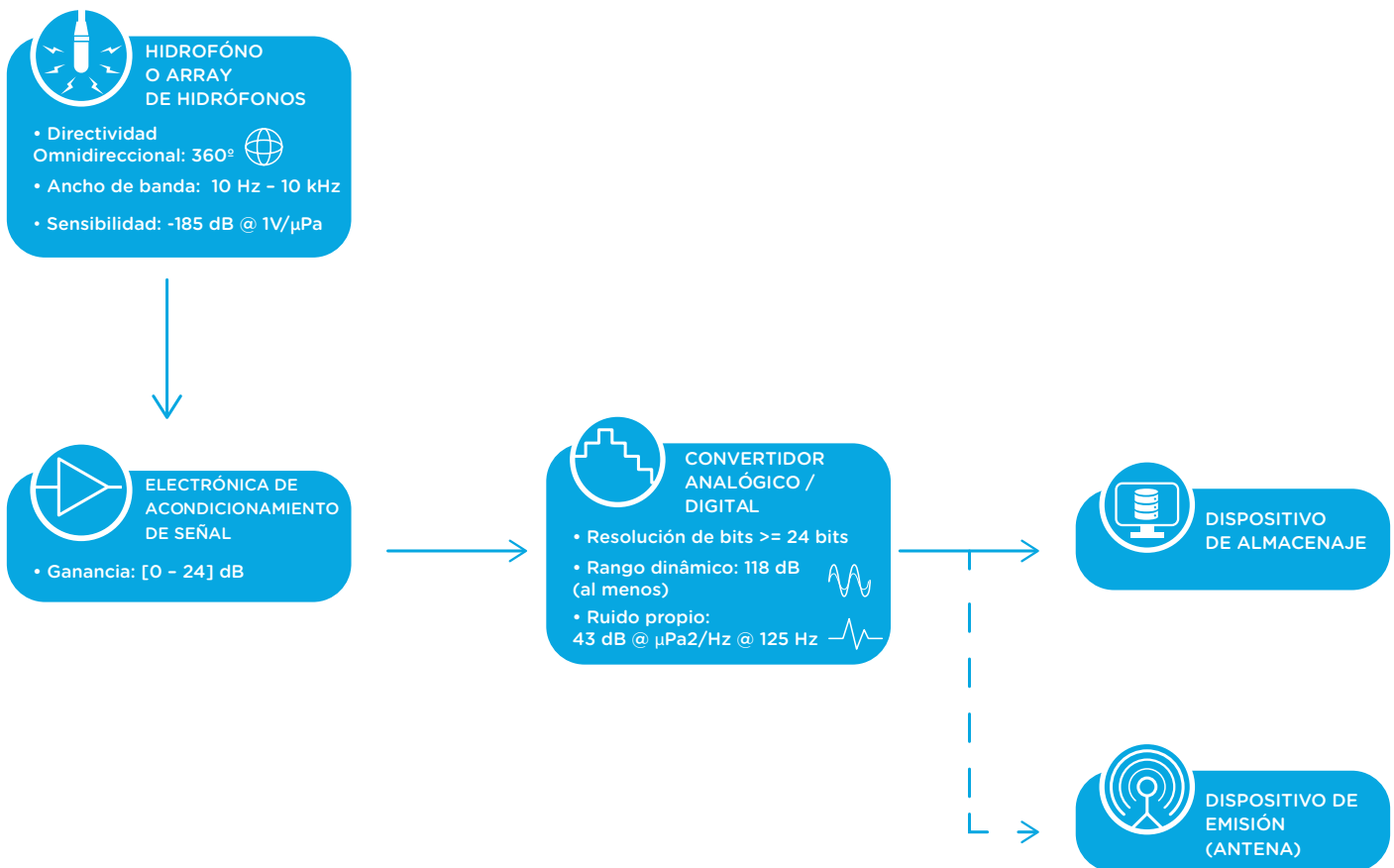


Figura 1. Sistema genérico de medición continua de ruido submarino.

2- Del inglés, Sound Navigation And Ranging.

2.1. Hidrófono

Un hidrófono es un transductor electroacústico que convierte las variaciones de presión del agua en variaciones de voltaje eléctrico (modo pasivo o receptor) y viceversa (modo activo o emisor). Así, en el caso de un PAM, el transductor funcionará en modo receptor.

Los principales parámetros que caracterizan un hidrófono son:

- **Sensibilidad:** ratio de conversión de presión a voltaje. Cuanto mayor sea este valor, mayor señal eléctrica será generada para un valor de presión dada. La sensibilidad ideal del hidrófono a utilizar dependerá de las fuentes de ruido en que estemos interesados, y vendrá dictaminada por el compromiso entre un buen valor del ratio señal-a-ruido para bajos niveles de sonido y la evasión de sobresaturación (para altos niveles de sonido). En general, se recomiendan valores de entre -165 dB re 1V/ μ Pa y -185 dB re 1 V μ Pa.
- **Rango frecuencial:** rango de frecuencias o ancho de banda en el que el hidrófono mantiene la sensibilidad dentro de un margen de tolerancia. Aunque los únicos rangos de frecuencia indispensables requeridos para satisfacer el criterio D11C2 de la MSFD son las bandas centradas en los tercios de octava de 63 y 125 Hz, se recomiendan hidrófonos de al menos un rango frecuencial entre 10 Hz y 20 kHz. No obstante, dado que la mayoría de los hidrófonos modernos gozan de un mayor ancho de banda y que existen frecuencias superiores para los que la vida marina es sensible, se recomienda ampliar dicho rango frecuencial entre 10 Hz y 150 kHz.
- **Directividad:** propiedad del hidrófono a ser más sensible en una dirección o en otra. Depende de la frecuencia y del tamaño del transductor. Un buen hidrófono debe presentar una respuesta omnidireccional (es decir, que presenta una respuesta al ruido igual en todas las direcciones) con una tolerancia no mayor de ± 1 dB en las bandas de tercios de octava de interés. Esta variable depende de la frecuencia y del tamaño del transductor. Cuando el tamaño es mayor que la longitud de onda acústica, el hidrófono mostrará direccionalidad; para un hidrófono típico esto sucederá a frecuencias del orden de 10 kHz. No obstante, puede aparecer en frecuencias menores (del orden de 1 kHz) si el hidrófono se instala en las proximidades de alguna estructura acústicamente reflectante.
- **Impedancia:** resistencia efectiva del hidrófono al paso de corriente alterna. Tiene importancia al acoplar el hidrófono a los restantes componentes del equipo PAM, pudiendo disminuir la ratio señal-ruido en casos desfavorables. Por tanto, se recomienda utilizar hidrófonos con valores bajos de impedancia (en el rango de décimas de ohmios) y/o que dispongan de electrónica interna para mejorar su adaptación.
- **Ruido propio:** señal que produce el hidrófono en ausencia de sonido y, por tanto, representa el mínimo nivel de sonido que puede detectarse con el aparato. Depende de la frecuencia y generalmente se expresa en unidades de dB re 1 μ Pa²/Hz, como un nivel de presión sonora. Se recomienda que sea al menos 6 dB inferior al mínimo nivel de ruido que se quiere detectar en el estudio en todo el intervalo de frecuencias.

En general, la información que proporciona el fabricante o proveedor del hidrófono sólo indica la sensibilidad en una frecuencia correcta, de modo que debe asumirse que es constante en el resto de las frecuencias del rango frecuencia, pero en algunas ocasiones, se proporciona la curva de calibración completa en función de la frecuencia. En cualquier caso, siempre es recomendable realizar una calibración inicial al adquirir un hidrófono nuevo, siendo arriesgado asumir que la curva de sensibilidad del hidrófono (si viene dada) coincide con la del producto en particular. Asimismo, **según la norma IEC 60565, los hidrófonos deben calibrarse al menos cada 24 meses.**

2.2. Electrónica de acondicionamiento de la señal

La electrónica de acondicionamiento de la señal es la encargada de adaptar la salida eléctrica del hidrófono de forma que, en el posterior procesado, se eviten problemas referentes al solapamiento o variaciones de componentes espectrales independientes del ruido submarino bajo estudio. Por ello, este elemento del PAM consta de:

- **Preamplificadores:** elemento que aplica un factor de ganancia a la señal registrada por el hidrófono, incrementando su amplitud a niveles más adecuados para su procesado. En ocasiones, los hidrófonos ya contienen preamplificadores internos cuya ganancia no es controlable y está ya incluida en su sensibilidad. Este tipo de hidrófono suele presentar bajo ruido y alta sensibilidad, no siendo generalmente adecuados para registrar señales de alta amplitud.
- **Filtros.** Son elementos encargados de la supresión de componentes frecuenciales no deseados en la señal. En el caso de las mediciones de ruido submarino, el filtrado es necesario en altas frecuencias para evitar el fenómeno de solapamiento (filtro paso bajo) y en bajas frecuencias para suprimir variaciones de presión sonora de baja frecuencia no relacionadas con el ruido submarino (mediante un filtro paso alto).

Asimismo, es indispensable que el rango frecuencial y ruido propio del sistema en conjunto sea posible de adaptar y, además, superior al del hidrófono.

Cabe destacar que los sistemas de medición acústicos pueden prescindir o no de esta electrónica, bien porque no se necesite para la aplicación en cuestión o bien porque ambos elementos se encuentran inicialmente integrados en el hidrófono.

2.3. Conversor analógico digital

Dispositivo electrónico que toma la señal eléctrica de entrada (analógica) y genera una salida numérica que indica la amplitud de la señal de forma digital. Este elemento resulta primordial en la monitorización acústica dado que determina el rango dinámico del sistema completo, que no es más que el rango de amplitud sobre el que el sistema de medición puede medir con precisión la presión sonora. Este rango debe ir desde el ruido propio del sistema (que se define como el valor mínimo de señal medible) hasta el valor máximo de amplitud de la señal que puede ser medido sin llegar a la saturación o distorsión de la señal³.

El rango dinámico se expresa como el número de bits con el cual cada señal es digitalizada. Además, este número de bits determina el error de cuantificación, que debe ser menor al del ruido mínimo que quiere ser analizado.

³- En el apartado de procesado de señal se encuentra una descripción más detallada de los parámetros de saturación y distorsión.

2.4. Almacenamiento de datos

Los datos de ruido digitalizados por el conversor son almacenados en una memoria desde la cual pueden ser descargados o transmitidos directamente a un ordenador externo para su almacenamiento definitivo y posterior procesado. Aun existiendo diferentes formatos de datos adecuados, no existe una estandarización para almacenar datos de ruido subacuático. Sin embargo, si es necesario que la calidad de los datos quede intacta para el procesado, por lo que el formato de guardado de datos para el almacenamiento debe ser un formato sin pérdidas.

Del mismo modo, si se consideran necesarios datos auxiliares o metadatos de los diferentes sistemas de monitorización para la interpretación de los resultados (como la configuración del ADC o el factor de ganancia), estos deben ser grabados y, deseablemente, incluidos en la cabecera de los ficheros o en un archivo log.

La unidad de almacenamiento de datos que se emplee debe tener memoria suficiente para los datos que se esperan registrar durante el periodo de medición. Para ello, el usuario deberá de realizar el siguiente cálculo:

$$\text{Memoria total [bits]} = \text{Frecuencia de muestreo del ADC} \left[\frac{\text{Muestras}}{\text{s}} \right] \times \text{Resolución ADC} \left[\frac{\text{Bits}}{\text{Muestras}} \right] \times \text{Tiempo de registro} \left[\text{s} \right]$$

2.5. Recomendaciones

Las recomendaciones que se establecen para cada uno de los elementos del sistema de monitorización de acústica pasiva se muestran en las siguientes tablas:

Hidrófono

Criterio	Requisito
Ancho de banda	10 Hz a 150 kHz
Sensibilidad	-185 dB @ 1V/ μ Pa (o superior) en el ancho de banda
Directividad	Omnidireccional
Calibración	Según estándar IEC60565 en el rango descrito en los últimos 24 meses

Electrónica de acondicionamiento de la señal

Criterio	Requisito
Ganancia	Programable entre 0 dB a 24 dB con pasos de 3 dB o 6 dB
Ruido propio	Superior al rango frecuencial y ruido propio del hidrófono
Rango frecuencial	Superior al rango frecuencial y ruido propio del hidrófono

Convertidor analógico/digital

Criterio	Requisito
Compatibilidad	Compatible con las especificaciones del hidrófono a emplear
Ruido propio	40dB @ $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ @ 1kHz (o inferior)
Rango dinámico	Suficiente para permitir el sonido más alto esperado sin distorsión ni saturación. Al menos 118 dB
Resolución	24 bits (o superior)
Certificación	El factor de conversión del ADC debe ser conocido e invariante con la frecuencia. El factor de escala utilizado en la generación de los archivos de datos formará parte del factor de conversión ADC.

Almacenamiento de datos:

Los registros de datos se consideran continuos cuando el sistema de medición adquiere el ruido submarino durante todo el periodo de implementación, por lo que es imprescindible que el sistema no se vea limitado por memoria o por duración de batería.

Idealmente, se requerirá que las mediciones sean en continuo. No obstante, se pueden realizar grabaciones de forma intermitente, donde el sistema se active y desactive automáticamente en los periodos más significativos de la implementación en cuestión, pero, para ello, debe estudiarse específicamente el problema bajo estudio no permitiéndose adoptar esta estrategia de medición como una metodología habitual.

3. Metodología para la medida de sonido antropogénico en el agua

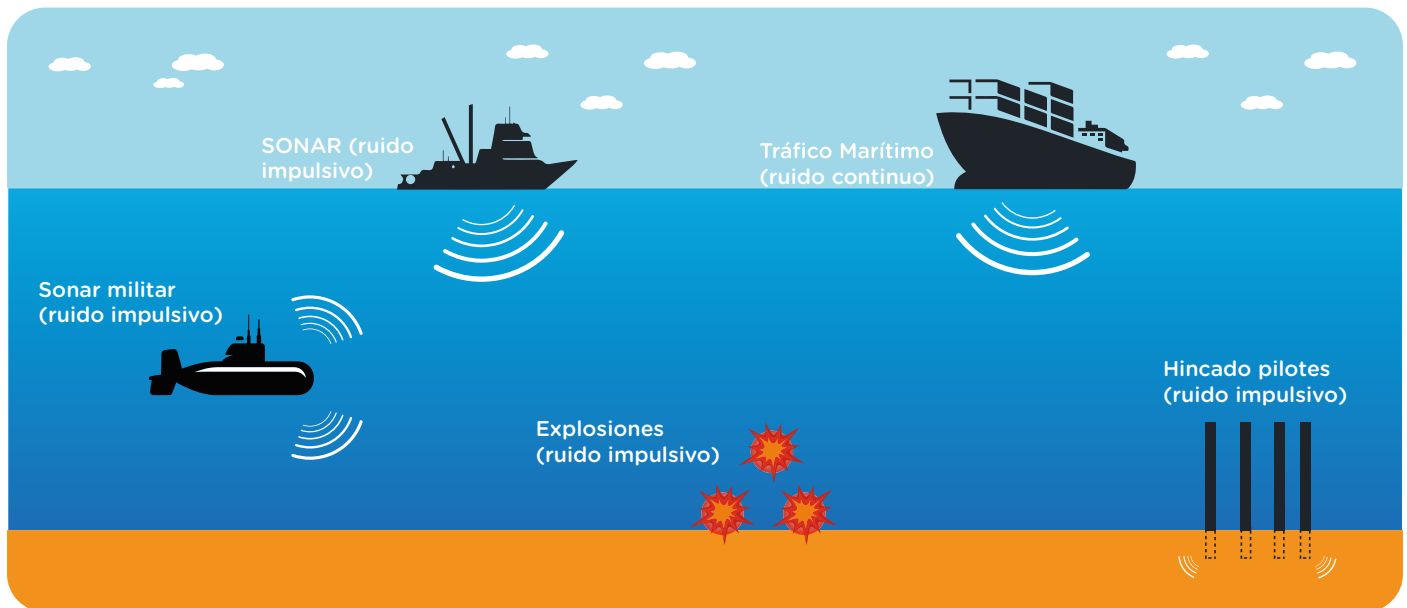


Figura 2. Esquema general de las fuentes generadoras de sonido antropogénico (continuo e impulsivo) en el agua.

3.1. Medida de sonido continuo en el agua

Los programas de monitorización acústica submarina se diseñan con el objetivo de establecer la tendencia de los niveles de ruido. Todo programa de monitoreo debe perseguir dos objetivos vinculados con estrategias de monitoreo específicas, separadas en:

- **Monitoreo de categoría A:** para establecer información sobre el ruido ambiental en una ubicación y para predecir el ruido real del fondo (emisión).
- **Monitoreo de categoría B:** para reducir la incertidumbre sobre los niveles de fuente que se utilizarán como entrada para los modelos de propagación acústica submarina.

3.1.1. Monitoreo de categoría A

El sonido en bajas frecuencias se propaga a largas distancias, y las bandas de frecuencia definidas por la MSFD estén dominadas por las rutas de navegación en los mares de Europa. Por lo tanto, para este propósito, es mejor colocar hidrófonos en lugares que estén alejados de las rutas de navegación para monitorear la diversidad de las contribuciones de ruido de una manera más equilibrada. Dicha estrategia es adecuada para la monitorización regional, y sólo se necesitaría un conjunto limitado de estaciones de medición por región para satisfacer los requisitos del primer objetivo.

Asimismo, los siguientes puntos son recomendables para este tipo de monitorizaciones:

- Monitorización sobre la distribución espacial de las actividades de la región.
- Monitorización de características de propagación del sonido: temperatura, salinidad, ondas de superficie o campo de ruido.
- El despliegue de sensores:
 - Para aguas de menos de 3000 m: en el intervalo de 30 a 100 veces la profundidad del agua (desde el punto más cercano de la ruta marítima).
 - Para aguas mayores de 3000 m: a una distancia de al menos 90 km del punto más cercano de la ruta marítima.

3.1.2. Monitoreo de categoría B

Las mediciones de ruido a una distancia apropiada y relativamente cercana a una ruta de navegación se pueden combinar con datos de embarcaciones individuales (de un sistema como el Sistema de Identificación Automatizada (AIS)) para proporcionar datos sobre los niveles de origen de la embarcación. Las estimaciones de estos niveles podrían usarse para describir fuentes de sonido individuales como entrada para los modelos de propagación. En este caso, sólo se necesitaría un conjunto limitado de estaciones de medición para cumplir con esta forma de monitoreo, ya que, en la mayoría de las regiones, una gran mayoría de barcos sigue las mismas rutas.

Para un carril de envío bien definido, la ubicación de la estación de medición debe estar a unos 100-500 m fuera del carril (medido desde el borde como especificado por la carta náutica); para una ruta de envío menos bien definida, un posicionamiento similar debería intentarse en base a información local. Para este tipo de monitoreo, los hidrófonos deben colocarse a la profundidad más cercana al mínimo de la velocidad del sonido.

3.2. Medida de sonido impulsivo en el agua

De acuerdo con [1], en el criterio D11C1, el sonido impulsivo se describe como “nivel sonoro de la fuente de energía monopolar en unidades de dB re 1 μ Pa, o como variación del nivel sonoro desde cero hasta el nivel máximo de la fuente monopolar en unidades de dB re 1 μ Pa m, ambos por encima de la banda de frecuencias de 10 Hz a 10 kHz”. Se apunta además la posibilidad de tener en cuenta otras fuentes específicas con bandas de frecuencias más elevadas si los efectos a larga distancia se consideran relevantes.

A la hora de abordar la medición de ruido impulsivo, hay que tener en cuenta, en primer lugar, los **tipos de fuentes** que se consideran generadores de ruido impulsivo, así como la **información necesaria** recopilar. Estos dos aspectos se describen a continuación.

3.2.1. Tipos de actividades generadoras de ruido impulsivo

Se considera ruido impulsivo a todos aquellos sonidos transitorios de corta duración, entre los que se incluyen tanto las señales de pulso (como las producidas por pistolas de aire, explosiones o dragados) como las señales sin pulso (como los sónares y dispositivos acústicos disuasorios). Conforme a [2], las principales fuentes generadoras de ruido impulsivo son:

- **Pistolas de aire.** Estos dispositivos son los más empleados para realizar exploraciones sísmicas marinas. Estos estudios son generalizados en todo el mundo, tanto en aguas poco profundas y profundas, así como en entornos costeros o marinos.
- **Hincado de pilotes.** Una técnica convencional empleada en muchas construcciones costeras y marinas, como parques eólicos, plataformas marinas, ampliaciones portuarias, etc. El crecimiento del sector eólico provocó un gran incremento en el uso de esta técnica tanto en entornos costeros como marinos.
- **Explosiones.** Las detonaciones submarinas pueden producirse para la eliminación de explosivos o pueden planificarse durante la construcción marítima, p. Ej. para fragmentar la roca antes del dragado. Esta es la fuente más fuerte de ruido submarino y debe tratarse con especial cuidado.
- **SONAR⁴.** Los sónares activos de baja, media y alta frecuencia (LFAS, MFAS, HFAS) se emplean durante ejercicios militares, así como durante estudios académicos e industriales, como estimaciones de poblaciones de peces y estudios batimétricos. Especialmente, los sónares navales de baja y media frecuencia son de gran preocupación dados los eventos de varamientos masivos de cetáceos vinculados en el espacio y el tiempo con ejercicios militares y deben ser tratados con especial cuidado.
- **Disuasores acústicos.** Dispositivos de alta potencia, diseñados para mantener a los mamíferos marinos alejados de las piscifactorías al causarles dolor. Las frecuencias oscilan entre 5-20 KHz para repeler pinnípedos y 30-160 KHz para delfines [3, 4, 5].

4- Del inglés, *Sound Navigation And Ranging*.

Otras posibles fuentes generadoras de ruido impulsivo son:

- **Boomers y sparkers.** Dispositivos de alta frecuencia que suelen ser utilizados para determinar características superficiales en sedimentos. También pueden ser remolcados por un buque de inspección mientras las señales emitidas penetran varios cientos (sparkers) o decenas (boomer) de metros de sedimentos por el alto espectro de frecuencia y la baja potencia de transmisión.
- **Ecosondas científicos.** Dispositivos que emplean la producción de sonido para localizar la profundidad del medio marino o bancos de peces. Se suelen utilizar mayormente en embarcaciones, barcos de pesca y embarcaciones de recreo.
- **Dragados.** Es una actividad que se lleva a cabo para mantener las rutas de navegación, extraer recursos geológicos y para enrutamiento de tuberías en el fondo marino.

La caracterización sonora de los equipos a utilizar en las campañas oceanográficas es siempre recomendable para garantizar el control sobre las emisiones que se generan en cualquier actividad potencialmente generadora de ruido.

3.2.2. Información relevante en las mediciones de ruido impulsivo

El programa de seguimiento del segundo ciclo (2018-2024) de las estrategias marinas españolas establece los siguientes parámetros a medir para ruido impulsivo:

- Nivel de la fuente (o proxy).
- Duración de la transmisión.
- Directividad de la fuente de ruido.
- Profundidad de la fuente de ruido.
- Velocidad de la plataforma (para fuentes de ruido móviles).
- Otros (OTH): identificador de la actividad/evento; tipo de fuente de ruido; posición de las fuentes de ruido; fechas de operación; espectro de la fuente de ruido (banda de frecuencia); ciclo de trabajo; medidas de mitigación frente al ruido submarino aplicadas durante el desarrollo de la actividad, si ese es el caso.

3.2.3. Valores umbral a considerar en el registro de ruido impulsivo

La guía metodológica desarrollada por el Technical Group on Noise (TG Noise) de la Comisión Europea [2], recomienda a los estados miembros crear un registro común de fuentes de ruido impulsivo con el fin de controlar y minimizar su potencial efecto negativo sobre la biodiversidad.

El umbral de nivel de fuente genérico (SL) para incluir las actividades potencialmente generadoras de ruido en el registro para fuentes sin pulsos es 176 dB re 1 μPa m, mientras que el umbral para la inclusión de fuentes impulsivas es un nivel de fuente de energía (SL_E) de 186 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{m}^2\text{s}$. Para armas de aire comprimido y explosivos, es más conveniente convertirlos en indicadores de cero a nivel de fuente pico (SL_{zp}) y masa de carga TNT equivalente (m_{TNTeq}), respectivamente. Para los dragados, no se debe utilizar un umbral mínimo y se deben registrar todas las actividades en relación con la draga.

Estas recomendaciones quedan resumidas en la siguiente tabla:

Tipo de fuente de ruido	Umbral para la inclusión de los eventos de ruido
Explosiones	m _{TNTeq} > 8 g
Pistolas de aire	SL _{zp} > 209 dB re 1 μPa m
Sonares de baja/media frecuencia	176 dB re 1 μPa m
Disuasores acústicos de baja/media frecuencia	176 dB re 1 μPa m
Otros pulsos	186 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{m}^2\text{s}$

Tabla 1. Umbrales mínimos para el nivel de fuente como condición de ser considerado en el registro de ruido impulsivo. Fuente [2].

Esta es una recomendación genérica de mínimos que no impide que cada estado establezca un umbral más exigente a considerar en la gestión de estas actividades.

Existen dos registros de ruido impulsivo a nivel europeo:

- Registro de ruido impulsivo para las regiones marinas OSPAR y HELCOM

<https://ices.dk/data/data-portals/Pages/impulsive-noise.aspx>

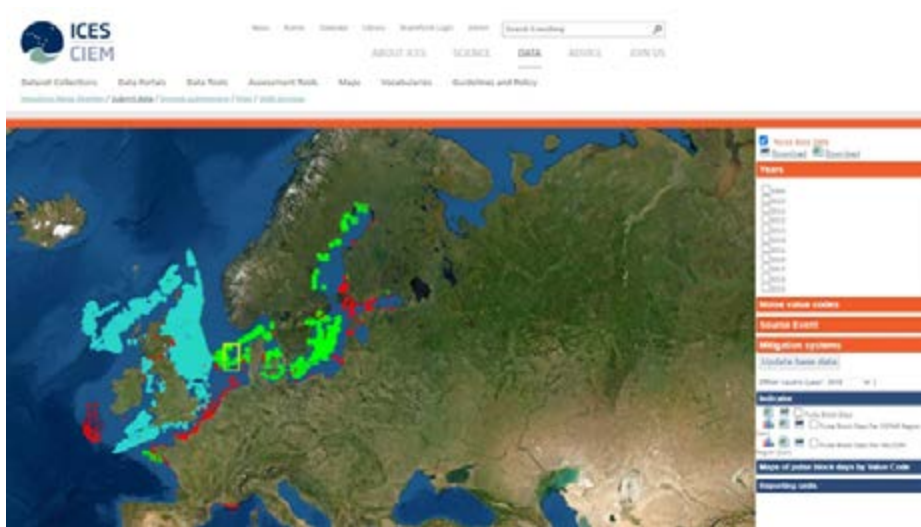


Figura 3. Registro de ruido impulsivo de las regiones marinas OSPAR y HELCOM. Fuente: ICES.

- Registro de ruido impulsivo del Mediterráneo

http://80.73.144.60/CTN_Geoportal/home/

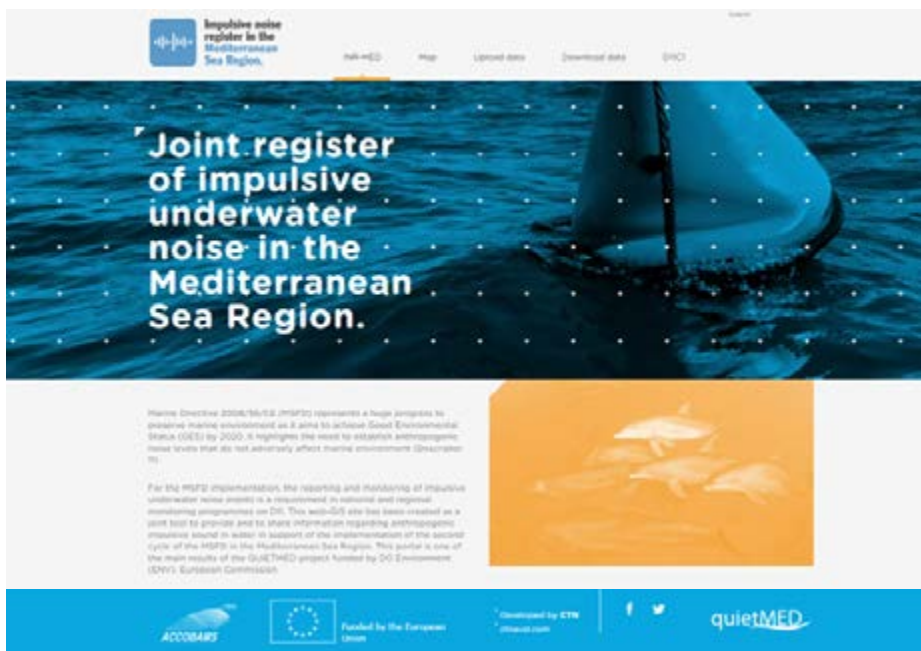


Figura 4. Registro de ruido impulsivo del Mediterráneo. Fuente: proyecto QUIETMED.

4. Sistemas de medición acústica

Para llevar a cabo la actividad de monitorización, se emplean sistemas de medición acústica PAM que comprenden, en único dispositivo, la instrumentación necesaria para los despliegues. Estos sistemas se clasifican en diferentes categorías dependiendo de la aplicación o despliegue para el que se quiera utilizar, pudiendo encontrar los siguientes:

- Sistemas a la deriva o boyas autónomas.
- Sistemas fondeados (fondeos).
- Sistemas de superficie.
- Sistemas en tierra.

Una característica que presentan algunos sistemas de monitorización es el dispositivo de transmisión de datos, que permite (dependiendo del tipo de sistema) enviar los datos de ruido registrados de forma, generalmente, inalámbrica hasta la unidad encargada del procesamiento o almacenamiento de estos.

Adicionalmente, los sistemas de monitorización pueden incluir, además del sensor acústico (hidrófono) sensores de posición (GPS), temperatura o profundidad entre otros. Así como también Y, dependiendo del tipo de despliegue equipos que facilitan el despliegue y recuperación de la parte de medición del sistema, liberadores acústicos o sistemas de anclaje, entre otros.

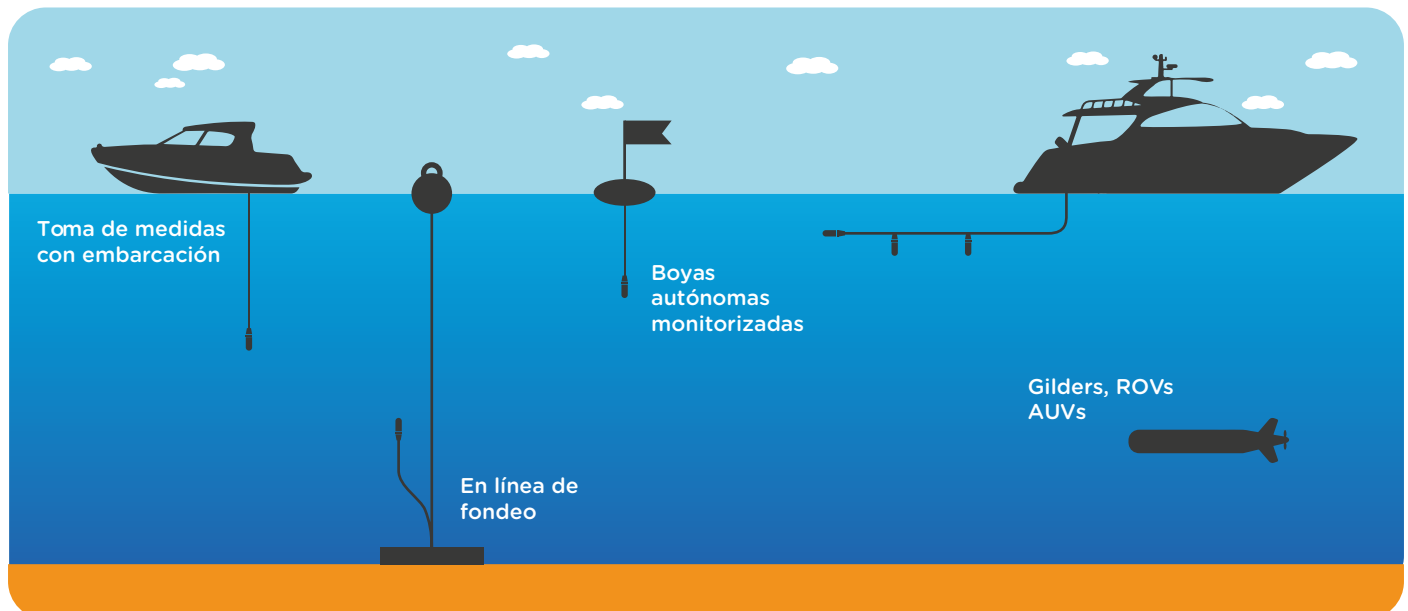


Figura 5. Sistemas de medición continua de ruido submarino.

4.1. Sistemas a la deriva (boyas)

El sistema de medición acústico se incorpora en la boya que se desplaza impulsada por el viento, las olas, corriente y marea. En ella, el hidrófono queda suspendido de la misma mediante un cable y el resto del sistema de monitorización queda protegido dentro de la boya (aunque también pueden diseñarse partes del sistema sumergibles que se suspendan junto al hidrófono). Como característica destacable, es importante que la posición del hidrófono se mantenga estacionaria al agua en su movimiento horizontal. Este tipo de despliegues se suele realizar cuando se quiere medir el ruido submarino continuo existente en fuertes corrientes o flujos de marea que provocan altos niveles de ruido. Con todo, debe tenerse en cuenta que estos sistemas pueden producir ruido debido a movimientos de la propia estructura, pero existen soluciones comerciales y técnicas de diseño para minimizar estos ruidos convenientemente.

4.2. Sistemas fondeados (fondeos)

El sistema de medición acústico se despliega en el fondo del mar, donde todas las partes del sistema excepto el hidrófono se sitúa en una carcasa contenedor para garantizar su funcionalidad bajo el agua. El hidrófono suele desplegarse por separado, pero cerca del contenedor, al que se conecta mediante un cable corto. En el diseño de estos sistemas es importante tener en cuenta la cantidad de datos que se quiere registrar (periodo de despliegue) para así emplear un tamaño de memoria y baterías acordes al mismo. Estos sistemas tienen la ventaja de que pueden desplegarse para largos periodos (dos años). Y, aunque las carcasas se diseñan para soportar grandes profundidades, la mayoría de los hidrófonos comerciales presentan la limitación de profundidad en el rango de cientos de metros, y solo unos pocos de 1000m.

4.3. Sistemas basados en superficie

Los sistemas de medición acústicos continuos se instalan sobre una plataforma de superficie, comúnmente un barco que puede estar anclado o flotando libremente. El hidrófono en este caso se despliega en el agua a la profundidad deseada mediante un cable que se conecta al resto del sistema, situado en el propio barco. La gran ventaja de estos sistemas es que funcionan en tiempo real, lo cual facilita ajustar los parámetros del sistema, controlar el funcionamiento del sistema, comprobar que no se pierden medidas e incluso, enlazar eventos ocurridos durante la monitorización. Resultan recomendables para mediciones de un corto periodo de tiempo, en aguas someras, cerca de la costa y donde el ruido propio de las embarcaciones es conocido y, por ende, puede suprimirse en el posterior análisis. Estos sistemas, pueden registrar ruidos no deseados provenientes de la embarcación, por lo que debe realizarse una monitorización convenientemente controlada y marcando claramente los momentos de monitorización respecto a los del movimiento de la embarcación.

4.4. Sistemas basados en tierra

En este caso, el hidrófono se despliega sobre el lecho marino y se conecta con un cable largo al resto del sistema de medición, cuya parte de acondicionamiento de la señal se encuentra incluida en el hidrófono para evitar la pérdida de señal debido a la longitud del cable. Estos sistemas, además de trabajar en tiempo real como el anterior, presentan la ventaja de que la localización del hidrófono es irrelevante y la falta de memoria o batería no es un problema. Sin embargo, la extensa longitud del cable y su despliegue pueden ser un problema debido a su alto coste, por ello, esta metodología tiene un propósito principalmente militar.

4.5. Otros sistemas.

Recientemente se han empleado nuevos sistemas y vehículos autónomos para la medición de ruido subacuático, como son los gliders, ROV⁵, AUV⁶. En este caso, todos los elementos se encuentran dentro del sistema.

La siguiente tabla muestra una serie de características comparativas entre estos sistemas:

Sistemas	Ventajas	Desventajas
Gliders	Autonomía Rango espacial Recoge datos en casi tiempo real	Velocidad. Baja profundidad (<1000 m). Riesgo de colisión.
ROV	Profundidad (>1000 m) Rango espacial Manejable en áreas con obstáculos submarinos	Coste. Control remoto limitado. Dificultad de operación en fuertes corrientes. Barco dedicado para dar soporte.
AUV	Tamaño. Portabilidad. Rango espacial. Autonomía de navegación.	Dificultad de operación en fuertes corrientes. Interferencia acústica en áreas pobladas. Barco dedicado para dar soporte.

Tabla 2. Tabla comparativa de características de sistemas y vehículos autónomos para la medición de ruido submarino.

5- Del inglés, Remote Operated Vehicle.

6- Del inglés, Autonomous Underwater Vehicle.

4.6. Recomendaciones y buenas prácticas

Todos los sistemas de monitorización descritos pueden ser utilizados tanto para un tipo de monitoreo, tanto continuo como impulsivo. Sin embargo, hay ciertas consideraciones que se deben tener en cuenta de cada uno de ellos que limitan en cierto modo la medición del sonido acústico submarino.

Los sistemas basados en fondeos y en boya tienen la peculiaridad de que la resolución espacial es baja, es decir, que las mediciones se verán limitadas a un punto espacial, no pudiendo registrar sonidos que se encuentren muy alejados de la localización de fondeo. En cambio, este tipo de sistemas resulta aconsejable para largos periodos de tiempo (viéndose, obviamente, limitado por la vida de la batería y la memoria de datos).

Por su parte, los sistemas basados en superficie presentan una baja resolución temporal dado que la duración de dichas campañas es menor, mientras que su resolución espacial es inherentemente mejor.

Por todo ello, es recomendable, siempre que se pueda, emplear diferentes sistemas de medición que combinen sus mejores prestaciones en cuanto a resolución temporal y espacial para así aportar a la medición la máxima resolución en los datos.

5. Calibración de hidrófonos

La calibración de los sistemas de monitorización acústica submarina, en este caso, los hidrófonos y el resto de la instrumentación utilizada con el fin de almacenar una señal acústica (los denominados sistemas de monitorización acústica pasiva o equipo PAM⁷), es determinante en la determinación de los niveles de sonido correctos de dicha señal. Tanto es así, que existen normas internacionales que describen el proceso de calibración rigurosamente:

- **IEC 60565-1:2020:** Acústica subacuática. Hidrófonos. Procedimientos para la calibración en campo libre. Detalla técnicas en campo libre para calibración desde 200 Hz a 1 MHz.
- **IEC 60565-2:2019:** Acústica subacuática. Hidrófonos. Calibración de hidrófonos. Parte 2: Procedimientos para la calibración de presión de baja frecuencia. Presenta otros métodos enfocados en bajas frecuencias (0.01 Hz - varios kHz).
- **ANSI/ASA S1.20-2012 (R2020):** Procedures For Calibration Of Underwater Electroacoustic Transducers.

Anteriormente se han visto los elementos que integran un sistema de monitorización acústica pasiva y los principales parámetros que los caracterizan, por lo que esta parte no se volverá a repetir aquí; sino que nos centraremos en los aspectos básicos de calibración de hidrófonos. Si bien no se entrará en mucho detalle (para ello el usuario queda dirigido a las normas expuestas en la lista de arriba), se explicarán algunas de las técnicas principales de calibración de hidrófonos, así como el fundamento de la problemática de la calibración en bajas frecuencias. Ahondando un poco en esta problemática, como se explicará más adelante, la calibración de hidrófonos en bajas frecuencias (< 1 kHz) en laboratorio es difícil de llevar a cabo, pues, según las técnicas estándar, requerirían de tanques de agua de extraordinarias dimensiones. Esto ha llevado a que la norma IEC 60565 se dividiera en las dos partes (en su última versión) que arriba se especifican, tratando una de ellas este específico problema. Además, es por esta razón que existen muy pocas instituciones en todo el mundo capaces de realizar calibraciones en bajas frecuencias de forma rigurosa. De hecho, a nivel nacional, el Centro Tecnológico Naval y del Mar (CTN), es el único laboratorio que ofrece la posibilidad de calibrar hidrófonos a partir de 1 kHz. Cabe destacar que este laboratorio es uno de los centros de referencia de metrología mundiales; en particular, en cuanto a calibración de hidrófonos, ha publicado algunos informes y artículos de interés, véanse, por ejemplo [6, 7].

La calibración de hidrófonos se realiza generalmente en tanques de agua en condiciones controladas de temperatura y presión hidrostáticas (la sensibilidad de un hidrófono depende ligeramente de dichas variables) en condiciones de campo libre para un rango de frecuencias amplio (desde unos pocos kHz hasta el MHz), si bien, como se ha comentado, existen otras técnicas que permiten ampliar el rango de frecuencias. Los diferentes métodos de calibración a veces se distinguen en primarios y secundarios, en base a si requieren (secundario) o no (primario) un hidrófono previamente calibrado. Otro criterio de clasificación está fundamentado en la existencia o ausencia de ecos en la señal registrada por los hidrófonos, así, se distingue entre calibraciones en campo libre (sin ecos) o campo reverberado (con ecos). Ambos tipos se exponen en el apartado 5.1.

7- Del inglés *Passive Acoustic Monitoring*.

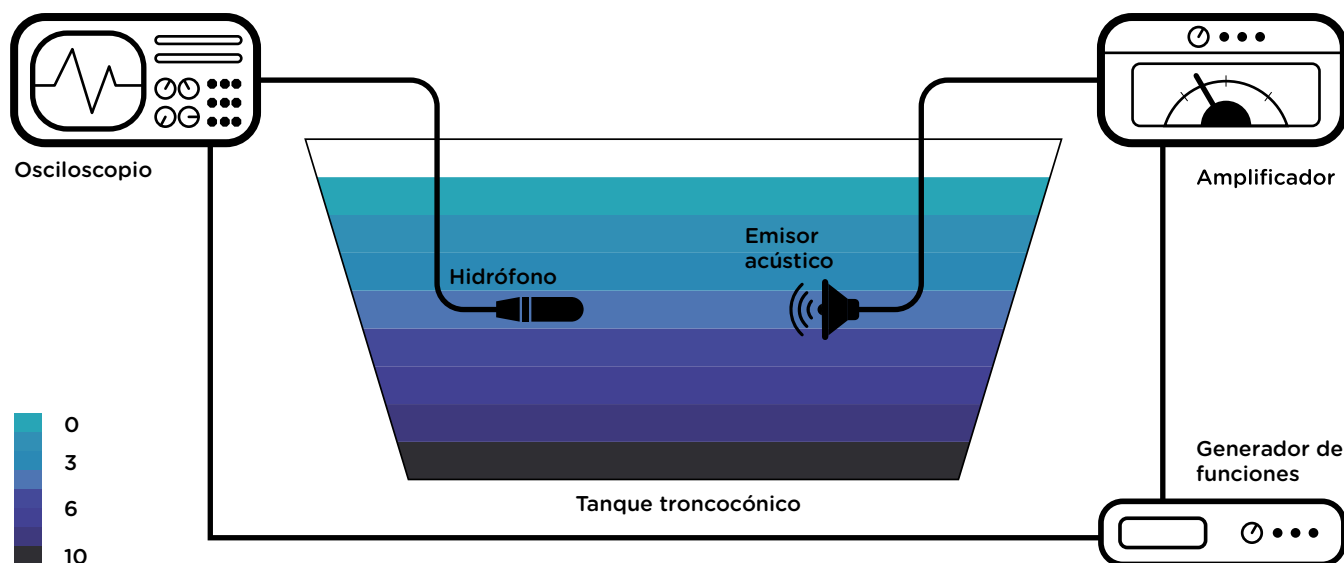


Figura 6. Esquema con los elementos típicos de un montaje de calibración.

5.1. Técnicas de calibración

La calibración del hidrófono consiste en caracterizar su sensibilidad en un cierto rango de frecuencias deseado (en función de la aplicación que se le va a dar al mismo).

La **sensibilidad** se define como el ratio entre el voltaje generado por el transductor piezoeléctrico y la presión acústica recibida por el mismo; es decir, caracteriza la respuesta eléctrica del hidrófono a las variaciones de presión. Por tanto, se expresa en unidades de V/Pa, aunque más habitualmente es expresado en decibelios y en μPa , o sea, en dB re 1 V/ μPa (“re” denota respecto), tal y como se muestra en la ecuación siguiente:

$$S \text{ [dB re 1 V}/\mu\text{Pa]} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{rms}/V_{ref}}{p_{rms}/p_{ref}} \right)$$

donde V_{rms} y p_{rms} son los valores rms⁸ del voltaje y la presión acústica, respectivamente, y V_{ref} y p_{ref} son valores de referencia ($V_{ref} = 1 \text{ V}$ y $p_{ref} = 1 \mu\text{Pa}$ ”, en acústica submarina).

8- Del inglés: root mean square.

Para hallar la sensibilidad de un hidrófono en un proceso de calibración, la idea básica es, en última instancia, conocer el valor de la presión acústica en la posición en la que el hidrófono a calibrar será colocado, para una determinada frecuencia. Cómo se consigue esto varía según el método de calibración utilizado. El campo acústico originalmente es producido por un transductor emisor, en la mayoría de los casos, aunque en última instancia será dependiente del método de calibración (por ejemplo, en el método de columna de agua vibratoria, la excitación acústica se genera por el movimiento mecánico del recipiente).

Debe notarse, tal y como muestra la figura más adelante, que **la sensibilidad es generalmente dependiente de la frecuencia**, particularmente en frecuencias cercanas a la frecuencia de resonancia del transductor. En cualquier caso, al realizar una calibración de un hidrófono, es necesario repetir el método de calibración para una serie de frecuencias que abarquen el rango frecuencial de interés. Por otro lado, un aspecto que no debe olvidarse, especialmente en el ámbito de la calibración, es la evaluación y expresión de las incertidumbres. En este sentido, pueden seguirse las recomendaciones de la GUM⁹[8] y sus suplementos, u de otras guías como la norma de la EA¹⁰[9] o las normas IEC 60565, en las que hay apartados específicos de incertidumbre para cada tipo de calibración.

Por último, debe tenerse en cuenta la deriva metrológica que se produce de forma natural en cualquier dispositivo o sensor. En el caso de los hidrófonos, y según la norma IEC 60565, los hidrófonos deben calibrarse al menos cada 24 meses pero, según el estado el grado de utilización de los hidrófonos, este periodo puede reducirse a 12 meses. A continuación, se ahondará en la clasificación de calibraciones en función de la reverberación: calibraciones en campo libre y en campo reverberante.

En definitiva, tras el proceso de calibración, el resultado debería ser similar a los mostrados en la Figura 7, preferiblemente acompañado de la tabla numérica correspondiente.

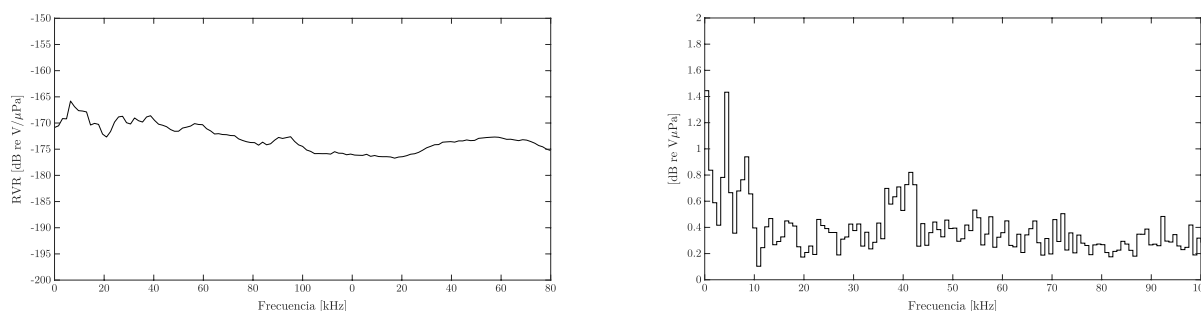


Figura 7. Curva de sensibilidad de un hidrófono calibrado por el CTN (arriba) junto con su correspondiente incertidumbre (abajo).

9- Guide to the expression of uncertainty in measurement.

10- European co-operation for Accreditation.

5.1.1. Campo libre

En un tanque (agua) o habitación (aire) de calibración, la señal acústica que es recibida durante cierto intervalo de tiempo por el hidrófono a calibrar consistirá, en general, en la señal directa y en contribuciones debidas a las reflexiones producidas con los límites del recinto.

Se dice que una calibración es en campo libre cuando solo se trabaja con la parte de la señal recibida antes de que aparezcan estas contribuciones por reflexiones. Para un tanque de determinadas dimensiones, el tiempo de vuelo hasta que se produce el primer rebote es fijo y puede calcularse mediante argumentos geométricos sencillos y el conocimiento de la velocidad del sonido en el agua; este será el tiempo disponible de señal a analizar¹¹. A continuación, se explican brevemente dos de los principales métodos de calibración en campo libre, y que históricamente han sido las más comunes.

Técnica de reciprocidad

La técnica más usada en campo libre es la de reciprocidad con tres transductores. Se trata de un método primario, puesto que ninguno de los transductores necesita estar calibrado para llevarse a cabo. Realizando mediciones por parejas, en las que los transductores se van usando tanto emisor como receptor, y siempre y cuando uno de los transductores sea recíproco (esto es, que sus sensibilidades de emisión y de recepción estén relacionadas por un factor constante), es posible determinar la sensibilidad de uno de los hidrófonos restantes. Además, debido al carácter relativo de las magnitudes implicadas en la obtención de la sensibilidad con este método, los errores sistemáticos son eliminados según este procedimiento.

Técnica de comparación

Otra técnica habitual, esta de tipo secundario, es la de calibración por comparación directa (también llamada de sustitución). En ella, se utiliza un hidrófono calibrado previamente para estimar el campo acústico en una posición, generado por una fuente controlada, para posteriormente ser reemplazado por el hidrófono a calibrar. Naturalmente, la sustitución debe realizarse de tal manera que se asegure que los centros de ambos hidrófonos coincidan en la mayor medida posible.

La problemática de las bajas frecuencias

La limitación de este tipo de técnicas es que, dado un tiempo de vuelo fijo, debido a que para realizar análisis estadísticos correctos de la amplitud de la señal se necesitan de un mínimo número de periodos de la onda (o ciclos), y este depende inversamente de la frecuencia, existe una cota inferior de la frecuencia para la que el número de ciclos será demasiado bajo como para poder realizar la calibración correctamente. Esta cota inferior es de un orden de magnitud de 1 kHz, por lo que las dos frecuencias señaladas en el descriptor 11 de la MSFD (63 y 125 Hz) quedarían fuera del rango de frecuencias estudiado con este tipo de calibraciones. El valor específico de esta frecuencia vendrá dado por las dimensiones del tanque de medición y del factor de calidad Q del transductor electroacústico a calibrar. En particular, si el tiempo de vuelo libre es τ , entonces el número de ciclos disponible para el análisis de la señal antes de que aparezcan ecos (y considerando el tiempo de relajación) vendrá dado aproximadamente por $f\tau \cdot Q$, donde f es la frecuencia. Naturalmente, cuando este valor sea menor que cero, ningún método en campo libre podrá ser utilizado para llevar a cabo la calibración, y otro tipo de métodos deberán ser empleados; este será el tema a tratar del siguiente apartado.

¹¹- Realmente habrá que tener en cuenta el factor de calidad Q del transductor electroacústico, que determina un tiempo de relajación (a condiciones de equilibrio) que habrá que desechar de la señal útil.

A modo de ilustración se usa el caso real de las instalaciones del laboratorio de hidroacústica del Centro Tecnológico Naval y del Mar (CTN), en particular de la balsa exterior. Esta instalación consiste en una balsa de agua, con forma troncocónica, de diámetro mayor de 20 m y una profundidad máxima de 10 m (ver Figura 8).



Figura 8. Balsa de calibración externa del CTN. Fuente: CTN.

En la Figura 9, a la izquierda, se muestra la geometría de la balsa de mediciones del CTN y, a la derecha, una gráfica con los volúmenes de agua útil y la frecuencia mínima de calibración, en función de la distancia entre los transductores. Las curvas se corresponden a la balsa, mientras que los puntos corresponden a distintas instalaciones existentes de calibración de hidrófonos [10].

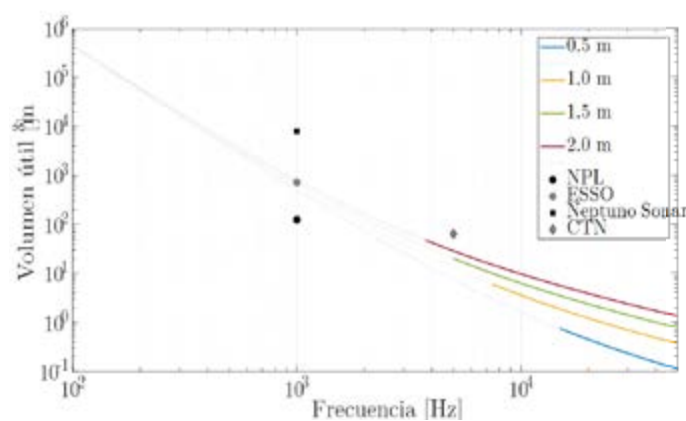
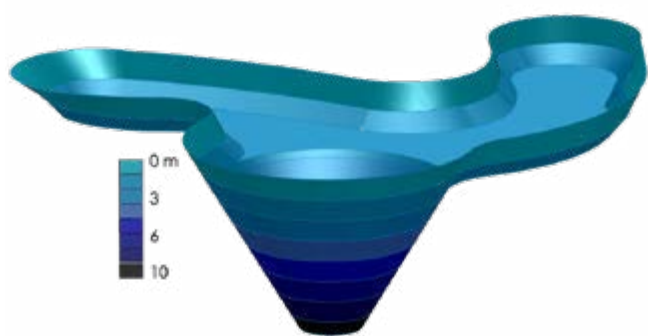


Figura 9. Izquierda, modelo en 3D del tanque troncocónico de grandes dimensiones del CTN. Derecha, frecuencias límite sin ecos en función del volumen útil. Fuente: CTN.

Como se demuestra, incluso para las grandes dimensiones de la balsa del CTN, los ecos limitan la frecuencia de calibración para estas técnicas a unos 3 kHz.

Adicionalmente, una forma de reducir el eco reflejado por los contornos del tanque de medición es utilizar un recubrimiento de material anecoico, como el patentado por el CTN, que se muestra en la Figura 10, caracterizado por un coeficiente de absorción de en torno a 0.9 para el rango de frecuencias desde 50 a 130 kHz. En cualquier caso, para solventar el problema de las bajas frecuencias, se han explorado otros métodos, que se introducen en el siguiente apartado.

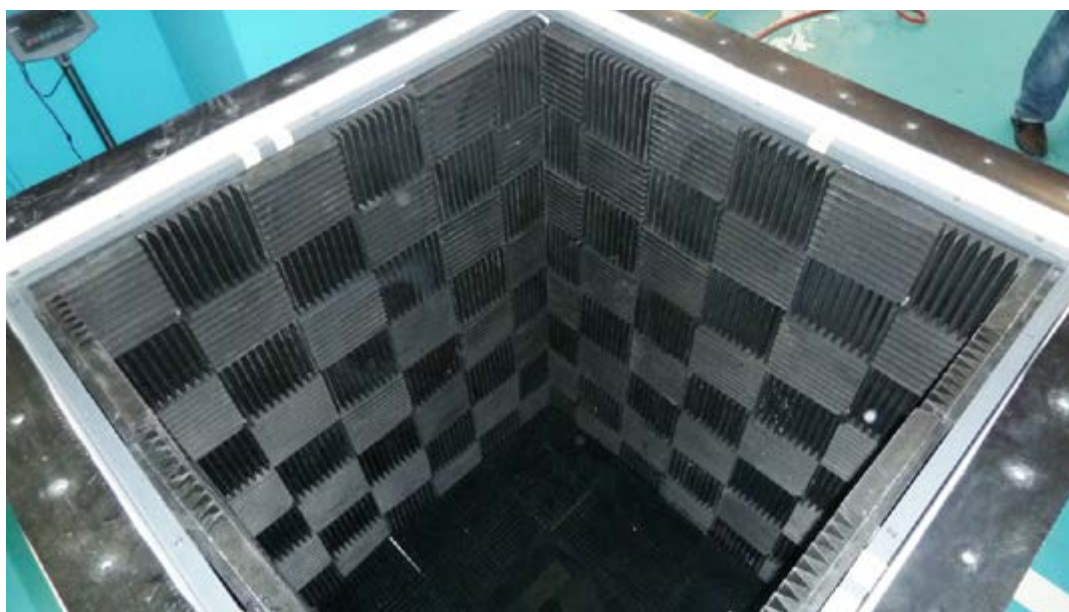


Figura 10. Tanque de medición recubierto con los paneles anecoicos del CTN. Fuente: CTN.

5.1.2. Campo reverberante y otros métodos

Las técnicas de campo reverberante, como su nombre indica, no tratan de aislar la porción de señal directa, sin componentes debidas a reflexiones, sino que mediante diversas maneras obtienen el valor de la presión acústica efectiva en la localización del hidrófono en condiciones de campo reverberado o difuso, esto es, un campo acústico en el que se puede considerar que el sonido llega desde todas direcciones. De esta forma, la limitación en baja frecuencia comentada en el anterior apartado puede ser efectivamente ignorada. Entre otros, podemos encontrar los siguientes tipos de métodos:

- Usando técnicas de suavizado o promediado de la señal.
- Creando campos acústicos de carácter aleatorio.
- Basados en técnicas de procesado (correlación cruzada, deconvolución cepstral).
- Modelizando el campo acústico en el tanque de medición.

Una colección de estos y otros métodos puede consultarse en el informe de métodos de calibración en baja frecuencia en tanques reverberantes del NPL [7]. Si bien la cantidad de métodos que se han explorado en la literatura no es pequeña, estos no han sido extensivamente probados. En este contexto, las técnicas mejor validadas pueden encontrarse detalladamente explicadas en la norma IEC-60656-2, entre las que destacan las siguientes:

- Calibración por excitación hidrostática.
- Calibración por compensación piezoeléctrica.
- Calibración por reciprocidad en acoplador acústico.
- Calibración por pistófono.
- Calibración por columna (de agua) vibratoria.

Históricamente, de entre estos métodos, el más utilizado es el de reciprocidad en acoplador acústico (únicamente en EE. UU., si bien hoy en día empiezan a surgir nuevos laboratorios acústicos en otros países como China o Rusia, en los que también se está adoptando esta técnica). Otra de estas técnicas que se puede encontrar aplicada en la bibliografía reciente es la de columna de agua vibratoria, en la que, curiosamente, la variación de presión (excitación acústica) es producida por un plato oscilante (ver Figura 11).

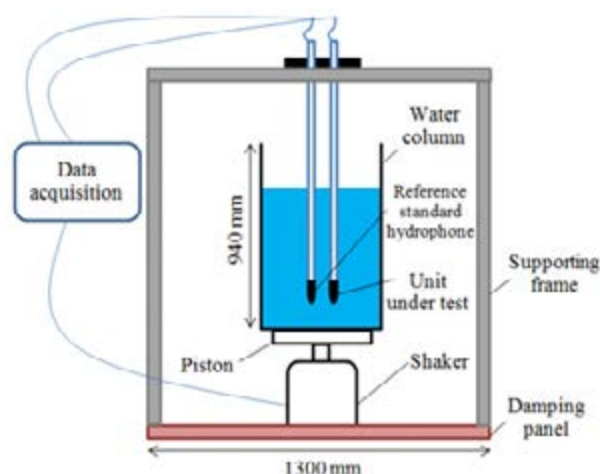


Figura 11. Esquema de calibración por columna vibratoria. Los dos hidrófonos, uno de referencia, y el sujeto a calibración, son colocados a la misma profundidad (misma presión hidrostática) en una columna de agua contenida en un recipiente soportado por un pistón capaz de oscilar verticalmente con una frecuencia controlada. Esta oscilación transmite ondas de presión al agua, generando efectivamente un campo acústico en bajas frecuencias. Fuente: [1].

6. Procesado

Una vez desplegados los equipos de monitorización y obtenidas las mediciones que se desean analizar, se debe proceder al procesado de estas. El procesado es una de las fases más importantes en la medición de ruido submarino pues junto con la representación de los datos proporciona la información referente al ruido submarino según los criterios establecidos en la MSFD para el sonido impulsivo (D11C1) y continuo (D11C2) para controlar la distribución espacial y extensión temporal, así como también que los niveles de sonidos antropogénicos no excedan los niveles que afectan negativamente a las poblaciones de animales marinos.

En esta guía se describen, por tanto, las diferentes etapas que constituyen el procesado de las señales acústicas, desde la calidad de los datos hasta la obtención de niveles de ruido submarino según los criterios establecidos:

- Pre-procesado de señales acústicas.
- Procesado de señales acústicas.
- Obtención y representación de los indicadores de ruido.

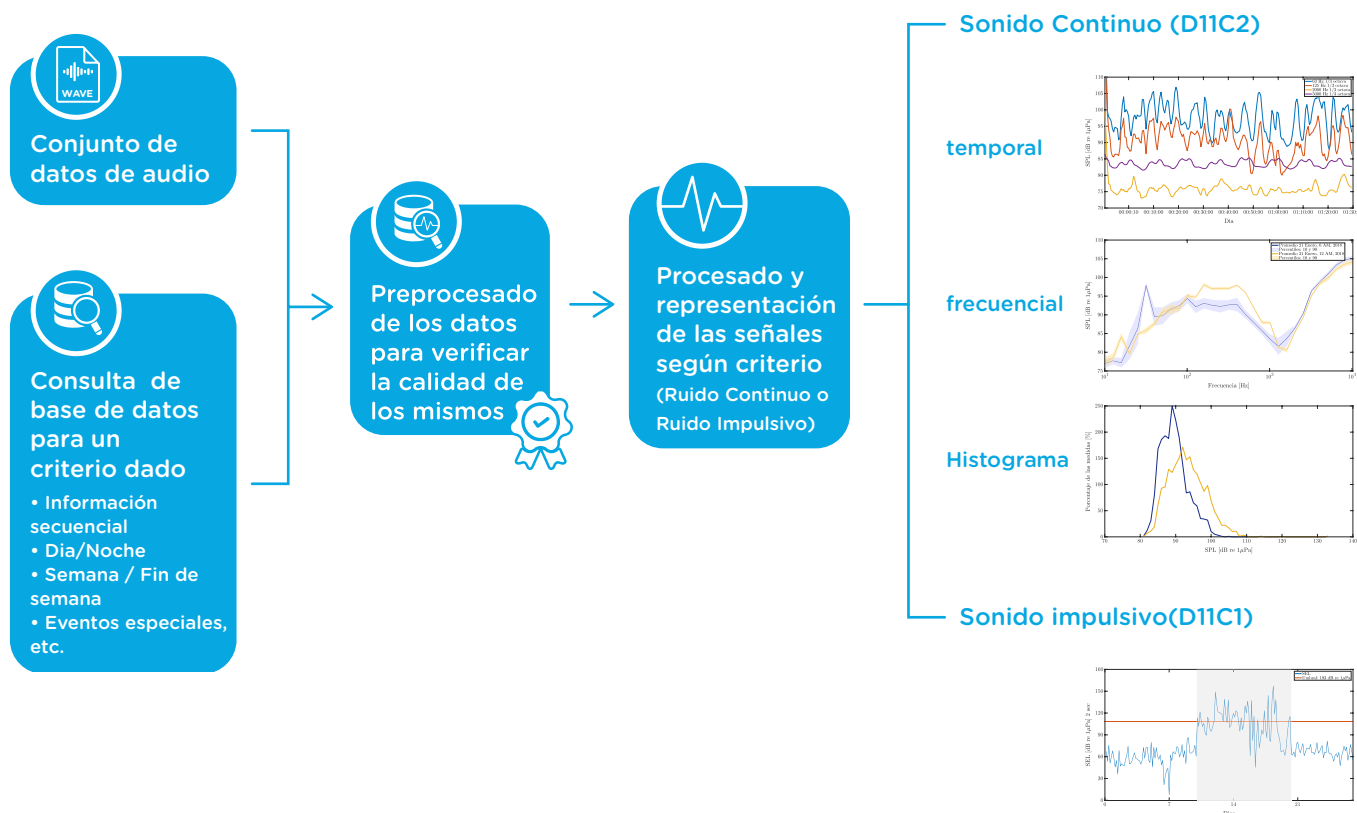


Figura 12. Esquema representativo del Procesado de señal acústico.

6.1. Pre-procesado

La etapa de pre-procesado es una etapa de vital importancia en el procesamiento de datos acústicos para la obtención de niveles de ruido pues hay que comprobar cuál es su calidad antes de realizar ningún procesamiento. La calidad de los datos se mide por los siguientes parámetros:

- Consistencia y cobertura de datos
- Saturación de la señal
- Conversión analógica a digital
- Ruido propio del despliegue

6.1.1. Consistencia y cobertura de datos

La adquisición de señales acústicas mediante cualquier sistema de monitorización conlleva la asignación de un periodo temporal para dicha adquisición. De este modo, se debe comparar el período de registro planificado con los datos medidos, así como también las longitudes de los archivos. De este modo se garantiza que todos los datos tienen la misma longitud y que han sido adquiridos durante el periodo de tiempo planificado. El resultado se muestra como el porcentaje del periodo real de adquisición por periodo planificado. Mientras que no hay un mínimo establecido, se recomienda detectar si la pérdida de datos se debe a una pérdida continua o intermitente. En el caso de que la pérdida de datos sea continua durante un largo periodo (según el periodo planificado), debe ser el usuario el responsable de determinar si se puede seguir adelante o no con el procesamiento o descartar esos datos; en el caso de que la pérdida sea intermitente, siempre y cuando el porcentaje no sea superior al 25 %, se puede proseguir con el análisis considerando, en cualquier caso, la pérdida de estos datos.

6.1.2. Saturación de la señal

La saturación de la señal se debe principalmente a la sensibilidad del sistema de adquisición para obtener el nivel de sonido correspondiente. Sin embargo, la saturación también puede producirse cuando una fuente sonora muy ruidosa pasa cerca de la localización del sistema de grabación.

Se puede diferenciar dos tipos de saturación, conocidas como saturación suave y dura. La primera de ellas se produce cuando los componentes analógicos del sistema de adquisición son los responsables de la distorsión de la señal. En cambio, cuando los responsables de la distorsión son los componentes digitales, se habla de saturación dura.

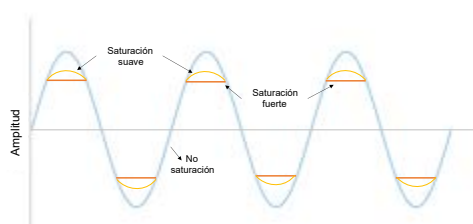


Figura 13. Saturación suave frente a saturación dura. Fuente: Quietmed.

Para garantizar que los niveles de ruido no se vean afectados por este fenómeno, es necesario detectar si este está ocurriendo. Para ello, se pueden realizar dos aproximaciones: un análisis en el dominio del tiempo o un análisis por el histograma. Sin embargo, dado que la saturación de la señal se mide en porcentaje de muestras saturadas, la detección de saturación por medio del histograma resulta más adecuada [12, 13]. El histograma de una señal no saturada puede aproximarse relativamente bien mediante una distribución simétrica (Figura 14), mientras que el de una señal saturada muestra un número alto de muestras con una amplitud similar a la del nivel de saturación (Figura 14). Así, la saturación puede ser detectada a través del cálculo de la desviación del histograma saturado relacionado con un histograma de una señal conocida no saturada.

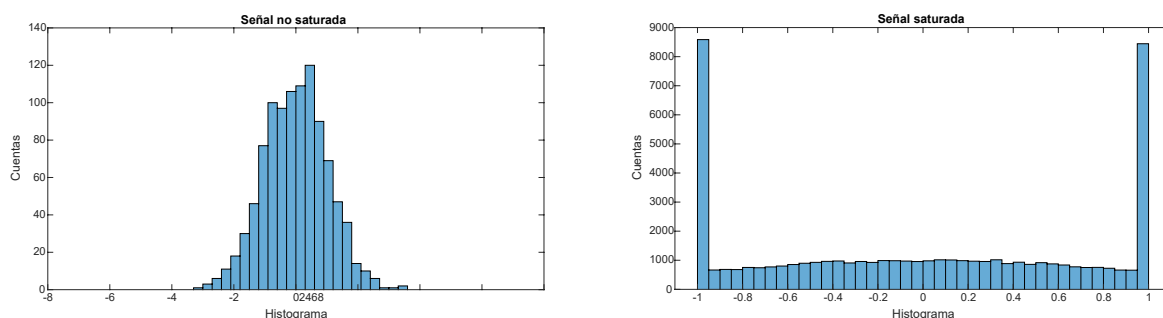


Figura 14. Histograma de una señal de audio no saturada. Derecha: Histograma de una señal de audio saturada.

Calcular la saturación en una señal de audio puede realizarse de varias formas. En esta guía proponemos el siguiente método, consistente en calcular del histograma de la señal la distancia desde los máximos locales de los extremos derecho e izquierdo hasta el centro del histograma o valor medio, tal y como se muestra en la Figura 15. Así, el valor máximo de esta distancia se puede normalizar por la distancia total dada por el indicador de saturación, donde el valor mínimo es 0 (no hay saturación) y el máximo es 1.

$$C_i = \frac{\max\{D_L, D_R\}}{D_T}$$

Se considera que la señal está saturada si el resultado de la ecuación proporciona un valor superior a 0.25. Por lo tanto, se recomienda que si se alcanza este nivel de saturación, este procesado se descarte pues los datos no son válidos.

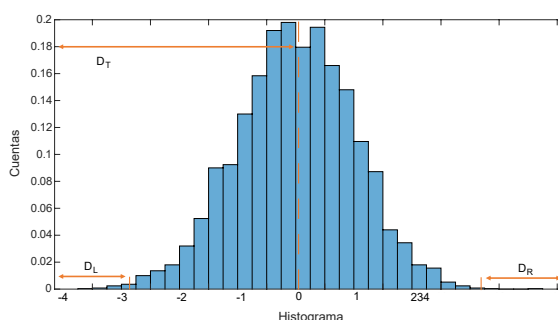


Figura 15. Ejemplo obtención saturación de la señal de audio mediante histograma.

6.1.3. Conversión analógica a digital

El nivel de presión sonora captado por el hidrófono es transferido al sistema de adquisición, que traduce la señal analógica a señal digital cuyas unidades son [unidades digitales]. Sin embargo, para la obtención de los indicadores de ruido es necesario conocer las unidades de presión sonora reales [μPa]. Por lo tanto, hay que aplicar una función de transferencia que realice dicha transformación. Esta función se describe como la sensibilidad inversa o $1/\text{sensibilidad}$ [dB re 1 $\mu\text{Pa}/\text{muestras}$] y depende de la frecuencia.

$$\text{SPL} [\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}] = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right)$$

Los cálculos que hay que tener en cuenta para llegar hasta la obtención del nivel de presión sonora (1) son:

- 1) La sensibilidad del hidrófono puede ser dependiente de la frecuencia o plano [dB re 1V/ μPa].
- 2) El preamplificador + ganancia de la placa del filtro (dependiente de la frecuencia) [dB]
- 3) ADC (con respuesta plana) [dB re muestras/1 V].

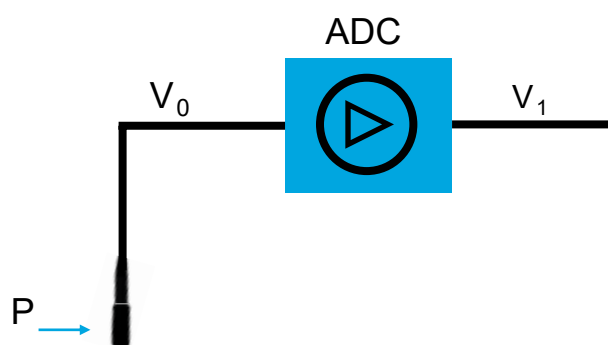


Figura 16. Esquema conversión analógico - digital. Fuente: CTN.

Ejemplo: Si suponemos un dispositivo PAM con un hidrófono de sensibilidad RVRy una ganancia Grx, la forma de obtención del SPL es la siguiente para una señal digital X_{voltios}:

1. Pasamos la señal a voltios:

$$X_{\text{voltios}} [\text{V}] = X_{\text{digital}} \times 10^{-(G_{rx} [\text{dB}]/20)}$$

2. Obtenemos el RVR [dB@agua]:

$$\text{RVR} \left[\text{dB re } \frac{\text{V}}{\mu\text{Pa}} \right] = 20 \log_{10} \left(\text{RVR} \left[\frac{\text{V}}{\mu\text{Pa}} \right] \right)$$

3. Convertimos RVR a [V/Pa]:

$$\text{RVR}_{\text{agua}} \left[\frac{\text{V}}{\text{Pa}} \right] = 10^6 \times 10^{\text{RVR} [\text{dB re } \frac{\text{V}}{\mu\text{Pa}}] / 20}$$

5. Obtenemos el SPL:

$$\text{SPL} [\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}] = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right)$$

Donde P_{ref}= 20 μPa al tratarse del agua.

6.1.4. Ruido propio del despliegue

Si bien el ruido propio del dispositivo debe conocerse antes del despliegue, ya sea porque ha sido proporcionado por el fabricante o porque se ha estimado durante la calibración, el ruido generado por la plataforma de despliegue o el amarre sigue siendo desconocido.

El ruido no deseado proveniente del despliegue mismo contamina los datos acústicos medidos incluso si se tiene cuidado durante la preparación del despliegue. Por lo tanto, es importante verificar las señales acústicas para asegurarse de que ningún ruido proveniente del despliegue contamine las grabaciones. Esto se puede hacer escuchando algunas de las señales y trazando espectrogramas, así como comparando los niveles promedio obtenidos del sonido grabado (una vez que se obtienen los niveles de ruido ambiental) con lo que se espera en esa ubicación. Si los datos de ruido ambiental no están disponibles para esa región, se pueden usar curvas empíricas clásicas para niveles de ruido ambiental como nivel de referencia [13, 14].

6.2. Procesado

Una vez que se ha realizado el pre-procesado al conjunto de señales adquiridas, donde se han descartado aquellas medidas que no se ajustan a los requisitos establecidos, comienza la etapa de procesado.

Esta etapa implica la obtención del nivel de presión sonora (SPL) a partir de lo establecido en la Decisión de la Comisión 2017/848/UE en la que se establece como indicadores de ruido ambiente las bandas de frecuencia entre los 63 Hz y 125 Hz en tercios de octava. Para ello, se han de filtrar las señales acústicas en las correspondientes bandas de frecuencia y, posteriormente, calcular el SPL:

$$SPL_{1/3} = 10 \log_{10} \frac{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P_{1/3}^2(t) dt}{P_0^2}$$

Donde $P_{1/3}(t)$ es la presión sonora en unidades lineales [Pa] para la correspondiente banda en 1/3 de octava y $[t_1, t_2]$ es el intervalo de integración de longitud T [sec]. Finalmente, el $SPL_{1/3}$ viene dado en unidades logarítmicas y referido a la presión de referencia $P_0 = 1 \mu\text{Pa}$.

Es importante destacar que hay dos métodos para realizar el filtrado de la señal acústica, $p(t)$, para obtener la versión filtrada $P_{1/3}(t)$. Por un lado, un filtrado en el dominio del tiempo mediante un banco de filtros en tercios de octava y, por otro, mediante la Transformada de Fourier, que implica un método más rápido y simple. Ahora, tanto las frecuencias en tercios de octava para los filtros como las correcciones del ancho de banda para evitar aproximaciones a las bandas reales de tercios de octava deben ser calculadas siguiendo la norma IEC 61260 (1995).

6.3. Métricas y unidades de medida

Finalmente, se deben de obtener las unidades de medida de los criterios D11C1 y D11C2 como se establece en [1]. De modo que:

- **Para el análisis de ruido impulsivo (D11C1)**, debe de obtenerse, al menos, el nivel de SPL para la banda frecuencial que va desde los 10 Hz hasta los 10 kHz. Asimismo, es recomendable obtener el nivel de exposición sonora (SEL), que tiene en cuenta tanto la amplitud de la señal acústica como la duración de la fuente acústica en consideración.
- **Para el análisis de ruido continuo (D11C2)**, se debe de obtener el SPL en las bandas de tercio de octava centradas en 63 y 125 Hz, tal y como viene descrito en (2), aunque recomienda ampliar dicho rango a entre 10 Hz y 20 kHz. Del mismo modo, la representación del ruido continuo se puede realizar para cualquier banda de tercios de octava de frecuencia entre 10 Hz y 10 kHz.

6.4. Representación de los datos

La representación e interpretación de los datos también forma parte del conjunto completo de medición de ruido submarino. Atendiendo a los dos criterios establecidos por la MSFD de ruido continuo (D11C2) e impulsivo (D11C1), se han de realizar diferentes representaciones de los datos.

6.4.1. Representación gráfica del sonido continuo (D11C2)

Las grabaciones acústicas a largo plazo dan lugar a grandes conjuntos de datos que deben almacenarse y procesarse para obtener una representación gráfica de los diferentes niveles e indicadores de ruido ambiental. Asimismo, en ocasiones es necesario referirse a un conjunto concreto de datos, por ejemplo, determinadas horas del día, fines de semana o día o noche. De este modo, se pueden realizar gráficas comparativas del ruido ambiental en diferentes circunstancias.

Las gráficas más representativas del procesado de ruido ambiental son: (i) representación del SPL en el tiempo, (ii) histograma del SPL y (iii) representación espectral del SPL en las bandas de tercios de octava establecidas.

SPL temporal. Esta representación te proporciona información del comportamiento del ruido en las frecuencias (63 Hz y 125 Hz) a lo largo del tiempo. Este eje temporal variará dependiendo del periodo que se quiera analizar. La Figura 17 muestra el nivel de presión sonora durante un día completo para las frecuencias de 63 Hz, 125 Hz y, adicionalmente, 2 kHz y 5 kHz.

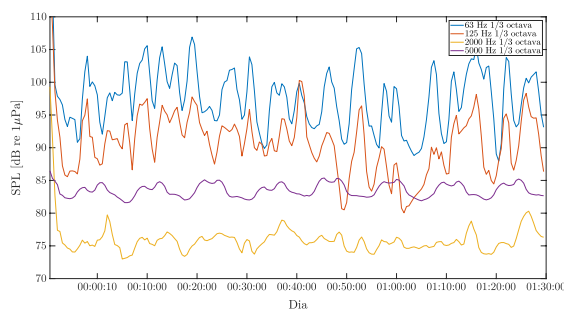


Figura 17. SPL vs Tiempo. Fuente: Quietmed.

Otra forma de representación del SPL temporal es mediante una representación a color de la presión sonora (eje derecho) para diferentes frecuencias (eje izquierdo) en un determinado intervalo de tiempo.

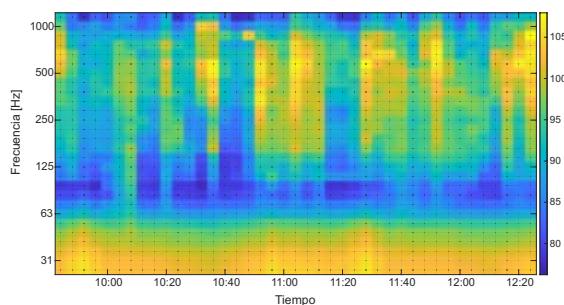


Figura 18. Representación a color del SPL vs Tiempo Fuente: Quietmed.

Por último, también se puede representar la tendencia media de los niveles de ruido en un año. Siempre y cuando se tenga en cuenta que este tipo de representaciones solo debe realizarse para tendencias anuales de los indicadores de ruido submarino. La Figura 19 muestra un ejemplo de esto, donde se representan los niveles de SPL para 63, 125 y 2000 Hz, con sus respectivos percentiles 10 y 90.

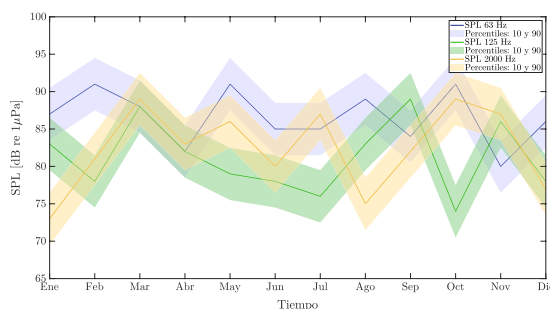


Figura 19. Representación de la tendencia del SPL en un año Fuente: Quietmed.

Histograma del SPL. Esta clase de representaciones permiten comparar señales obtenidas en diferentes periodos (ya sea diferentes horas, días, meses, años...) y saber con qué frecuencia se obtienen los diferentes valores de SPL durante ese periodo de tiempo. Tomando como ejemplo la siguiente figura, donde se representa el SPL en la banda de tercios de octava de 2 kHz de un fin de semana (en azul) y de una semana (amarillo), se observa que el nivel de ruido en la banda de 2 kHz es mayor durante el fin de semana que durante la semana. Lo que puede llevarnos a pensar que se debe a la actividad recreacional del parque marino donde se han realizado las mediciones.

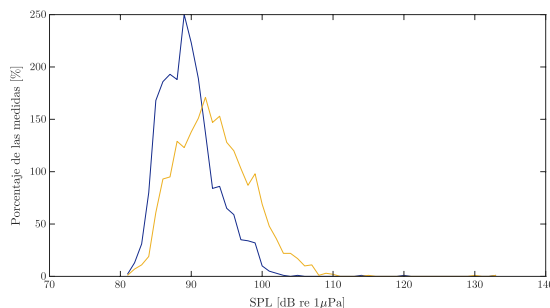


Figura 20. Representación del histograma de los SPL Fuente: Quietmed.

SPL frecuencial. Las representaciones espectrales juegan un papel importante en el análisis de la distribución de energía de la medición del ruido submarino. Permite un mejor entendimiento de las fuentes acústicas submarinas y además, las representaciones en tercios de octava proporcionan resolución suficiente para distinguir diferentes eventos acústicos. Sin embargo, para el análisis de eventos más específicos como firmas acústicas navales, esta resolución debe ser mayor.

La siguiente figura muestra un ejemplo del espectro acústico del piloto en Cabrera durante el proyecto QUITMED. En ella se observan los datos promedios del 21 de enero de 2018 a las 6 de la mañana (azul) y la comparación de los mismos a las 12 am junto con los percentiles 10 y 90 (sombreado).

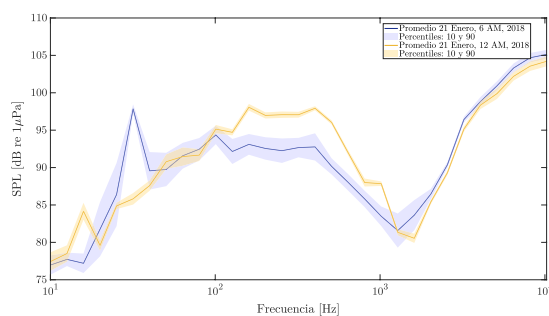


Figura 21. Representación espectral del SPL Fuente: Quietmed.

6.4.2. Representación gráfica del sonido impulsivo (D11C1)

El criterio recomendado por la MSFD para la medición de ruido impulsivo se centra en la duración por año de las fuentes de sonido impulsivo, su distribución anual y espacial en el área de evaluación y si se han alcanzado o no los valores umbral fijados. Por ello, el gráfico de ruido impulsivo puede tener diferentes representaciones.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de una posible representación gráfica, donde se muestra el nivel de exposición sonora frente al tiempo junto con el número de días que exceden un umbral dado. En esta gráfica, se puede ver durante cuánto tiempo se ha superado el umbral, así como también el nivel de SEL durante ese tiempo. Cabe destacar que esta gráfica se puede representar tanto para un corto periodo (horas) hasta incluso meses o años.

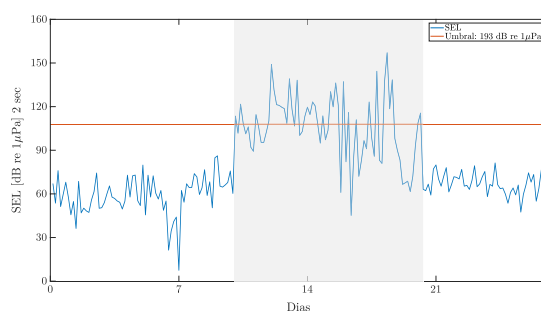


Figura 22. Ejemplo gráfico de la representación del ruido impulsivo (D11C1). Fuente: Quietmed.

7. Modelización

El uso combinado de mediciones de ruido submarino y modelos es la manera más eficaz de monitorizar los niveles y tendencias de ruido ambiente en una determinada región del océano [2]. La principal ventaja de la modelización frente a las medidas in-situ de ruido submarino es su menor coste, ya que no requiere del despliegue de medios necesario para realizar campañas en el mar, una tarea logísticamente compleja.

En las especificaciones y métodos normalizados para el seguimiento y la evaluación del propio descriptor 11 (criterio 2) de los indicadores de buen estado medioambiental de la Directiva Marco sobre la Estrategia Marina (MSFD), encontramos la siguiente declaración que explicita la importancia de la modelización del sonido como apoyo a las mediciones de campo:

“La media anual [...] de la presión sonora al cuadrado en cada una de dos bandas de tercio de octava, una centrada en 63 Hz y la otra en 125 Hz, expresadas como nivel sonoro en decibelios, en unidades de dB re 1 μ Pa, con una resolución espacial adecuada en relación con la presión. Este valor se podrá medir directamente, **o bien deducirse** de un modelo utilizado para interpolar entre mediciones, o por extrapolación de las mediciones.”

Aunque en los últimos años se lleva haciendo un esfuerzo por alcanzar unos estándares internacionales en monitorización de ruido submarino ocasionado por barcos y martillos percutores (estándares ISO 17208), no sucede así con la modelización de la propagación acústica submarina, si bien se pueden encontrar ciertas recomendaciones en los informes del TG-NOISE12 [2, 16]. Este grupo mantiene que deben desarrollarse estándares que incluyan no solo el proceso de medición, sino la modelización y el almacenaje de datos en aplicaciones de monitorización del ruido subacuático.

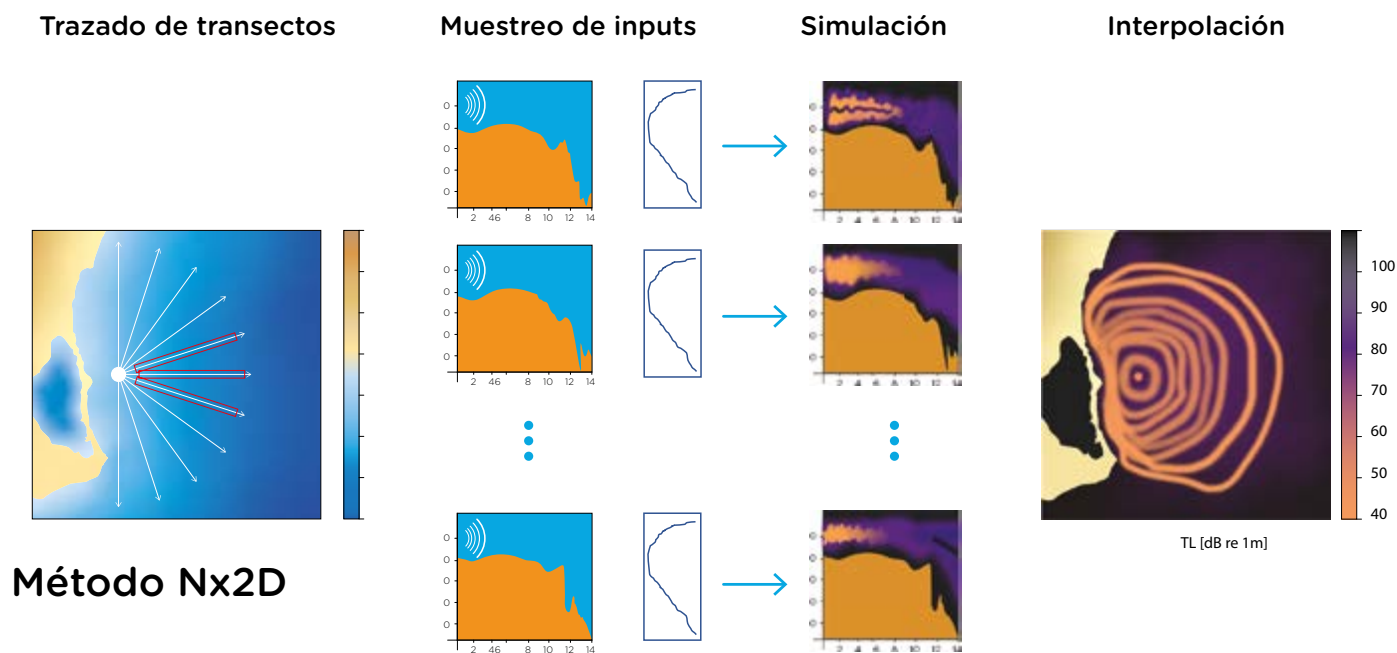


Figura 23. Creación de mapas de sonido en tres dimensiones con el método Nx2D.

12- Grupo técnico de ruido submarino de la MSFD.

7.1. Modelos de propagación acústica submarina

Un modelo típico de propagación acústica describe la dependencia espacial de la transmisión del sonido, fenómeno llamado pérdidas de transmisión¹³ (TL), en un cierto entornocaracterizado a partir de parámetros como la batimetría, el perfil de velocidades del sonido y las propiedades elásticas del lecho marino, para una fuente acústica caracterizada por la frecuencia de emisión, directividad y nivel de presión sonora a un metro de la misma. Existe una gran variedad de modelos que se han desarrollado para resolver la ecuación de ondas acústica en el entorno marino. Los más utilizados se basan en diferentes aproximaciones de dicha ecuación, como son:

- Teoría de rayos.
- Modos normales.
- Ecuación parabólica.
- Integración por número de onda.
- Flujo energético.

Cada uno de estos modelos son aplicables bajo ciertas condiciones (véase laTabla 3), de modo que la clasificación habitual de aplicabilidad para cada modelo depende de la profundidad del mar bajo estudio y frecuencia de emisión de la fuente de interés. Así, por un lado, se suele distinguir entre aguas profundas y aguas someras, siendo aproximadamente la cota de 200 metros la división entre ambas, aunque una definición más rigurosa vendría dada en función de la longitud de onda y la profundidad particulares de la simulación, de tal forma que se tuvieran aproximadamente -10 longitudes de onda en la columna de agua. En cuanto a la frecuencia de emisión, un umbral de corte entre lo que se consideran bajas y altas frecuencias podría establecerse en los 500 Hz, y aunque este valor es ciertamente orientativo, refleja que a frecuencias superiores la mayoría de modelos numéricos (excluyendo los de rayos) empiezan a ser computacionalmente intensivos.

Por otro lado, también existen referencias a los típicos métodos por diferencias (y elementos) finitas, si bien debido a la enorme carga computacional que conllevan son poco utilizados.

Por lo general estos modelos se suelen aplicar en banda estrecha (e.g. una frecuencia), si bien no están limitados a este caso, pudiendo generalizarse para tratar escenarios de banda ancha, con el correspondiente aumento de la carga computacional requerida, por supuesto.

¹³- Cantidad de energía acústica perdida en referencia al valor existente a 1 metro de la fuente acústica.

Leyenda:  No válido  Limitado  Ideal

Aproximación	Aplicación			
	Aguas someras		Aguas profundas	
	Baja frecuencia	Alta frecuencia	Baja frecuencia	Alta frecuencia
Rayos	No válido	Limitado	Ideal	Limitado
Modos normales	Limitado	Ideal	Ideal	No válido
Int. número de onda	Limitado	Limitado	Limitado	Ideal
Ecuación parabólica	Limitado	Ideal	Limitado	No válido
Flujo energético	Limitado	Limitado	Ideal	Ideal

Tabla 3: Grado de aplicabilidad de los diferentes modelos.

Además, existen otros modelos de corte simplificado, no basados en ecuaciones integro-diferenciales (y por tanto mucho más rápidos) que, aunque la mayoría son raramente aplicables a situaciones reales, resultan útiles como primeras aproximaciones y en validar otros modelos más sofisticados. Entre ellos podemos destacar (quizá reducir esta parte y centrarnos en los numéricos):

- Propagación esférica: caracteriza la propagación libre sin reflexiones (aguas profundas).
- Propagación cilíndrica: caracteriza la propagación en un canal
- Colossus [16]: modelo semi-empírico adecuado para transmisión en aguas someras.
- Efecto Lloyd (reflexión en superficie): tiene en cuenta la reflexión con la superficie (especular y plana) del mar (lo que origina el llamado efecto Lloyd).
- Método de las imágenes (superficie-lecho): modelo de propagación para un transecto con batimetría horizontal y perfil de velocidad constante.

El uso de estos modelos puede emplearse como complemento a los modelos más complejos o como cálculo previo antes de su implementación.

7.1.1. Parámetros de entrada

Para llevar a cabo una simulación, a los modelos numéricos se les deben suministrar ciertas variables de entrada o inputs, que pueden variar de un modelo a otro. No obstante, hay algunas entradas que siempre deben definirse y se dividen en tres categorías:

- 1) Parámetros de cálculo:** escala del mallado, parámetros de la fuente acústica (tipo de fuente, frecuencia(s) de emisión, direccionalidad) y resto de parámetros relativos al cálculo numérico y la implementación particular de cada modelo.
- 2) Variables ambientales (agua):** perfil de velocidades del sonido (SSP), coeficiente de absorción.
- 3) Variables ambientales (lecho):** parámetros elásticos (densidad, velocidad del sonido, atenuación) del lecho marino, perfil batimétrico.

Ya que los parámetros de cálculo son en cierta medida independientes de la localización del estudio, a continuación, se describen las variables ambientales, que vendrán dadas por la naturaleza del entorno marino.

7.1.1.1. Perfil de velocidades del sonido (SSP)

El perfil de velocidad del sonido en profundidad es probablemente la variable ambiental más importante para estudios en aguas profundas, pues determina la refracción de las ondas acústicas.

La forma de este perfil depende de cómo varían la temperatura, presión y salinidad del agua con la profundidad, por lo que, considerando que la presión depende básicamente de la profundidad, y la salinidad no varía en gran medida, en general el perfil tendrá un marcado carácter estacional que dependerá de si se trata de un entorno de aguas someras o profundas.

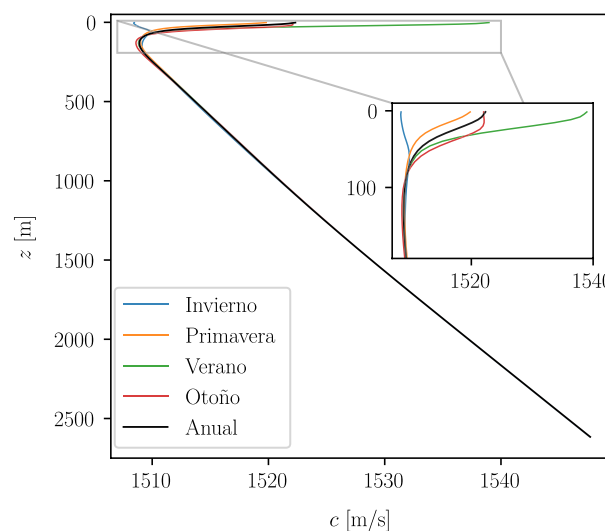


Figura 24. Perfiles de velocidad del sonido calculados en una zona del Mediterráneo Oeste, a partir de datos de temperatura y salinidad en profundidad del portal Copernicus. Fuente: CTN.

Este perfil puede ser obtenido in-situ mediante un equipo de medición de conducción, temperatura y presión hidrostática (equivalente a la profundidad), denotado usualmente como equipo CTD (conductividad, temperatura, profundidad), o desde algún repositorio online (y siempre puede obtenerse a partir de los tres parámetros mencionados: temperatura, salinidad y presión/profundidad). Una base de datos de referencia es la Global Ocean Sound Speed Profile Library (National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA), con un catálogo global de perfiles de velocidad por meses y una resolución espacial de 0.25 grados.

Por supuesto, otra opción es, mediante el uso de un modelo de velocidad del sonido en agua y, a partir de datos de la temperatura y salinidad en profundidad, calcular el perfil de velocidades. Ejemplos de bases de datos de acceso libre de estos parámetros (particularmente extensas en Europa) son el servicio Copernicus del entorno marino (Copernicus Marine Environment Monitoring Service¹⁴), o, EMODNet¹⁵ (European Marine Observation and Data Network).

7.1.2. Batimetría

En aguas menos profundas, la batimetría (y las propiedades del medio material que la forma, en el siguiente punto) toma un papel más importante, y es que el número de reflexiones con el lecho marino es naturalmente mayor en estos entornos. El relieve particular de un transecto en aguas someras influye significativamente en los resultados de las simulaciones (como se muestra en la figura 25).

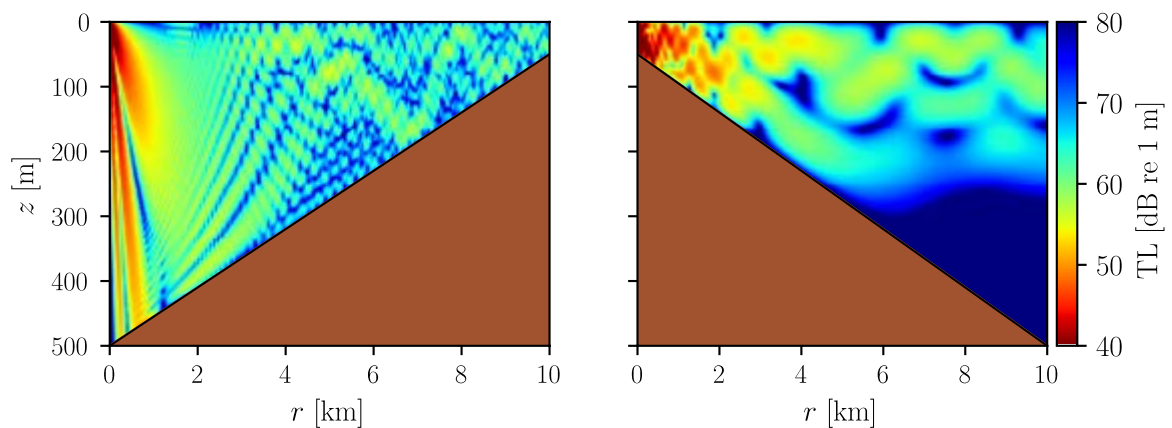


Figura 25. Comparación de los efectos que dos perfiles simples de batimetría tienen en las pérdidas de propagación, manteniendo constantes el resto de los parámetros. Fuente: CTN.

14- <https://marine.copernicus.eu/>

15- <https://www.emodnet.eu/portals>

Afortunadamente, existe gran cantidad de conjuntos de datos de batimetría disponibles al público; además, no es inusual que los gestores de áreas marinas o portuarias dispongan de datos batimétricos (o los medios para conseguirlos) de alta resolución. Batimetría global con relativamente buena resolución puede obtenerse, por ejemplo, de la base de datos GEBCO¹⁶ (General Bathymetric Chart of the Oceans), que dispone de datos de relieve tanto en agua como en tierra, con una resolución de 15 segundos de arco (en latitudes como la de España equivale a una distancia del orden de 350 m), o del portal de batimetría de EMODnet, que integra un mayor número de bases de datos disponibles, y cuya resolución en grados decimales alcanza los 0.001⁹, que, para latitudes típicas de España, equivale a unos 80 metros de distancia.

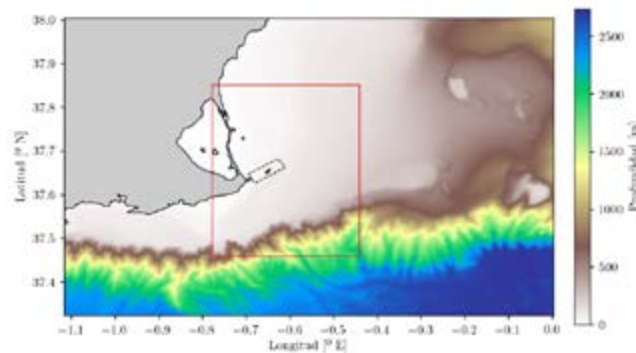


Figura 26. Batimetría de la costa murciana, centrada en la reserva marina de Cabo de Palos e Islas Horrigas, a partir de datos de EMODnet. Fuente: CTN.

7.1.3. Propiedades del lecho marino

De igual forma que la batimetría toma importancia en aguas menos profundas, también lo hacen las propiedades físico-acústicas del medio del lecho marino (a saber: densidad del medio y velocidades de propagación, transversal y longitudinal, y coeficientes de atenuación en el medio, de las ondas transversales y longitudinales), que caracterizan la reflexión y transmisión acústica en el mismo. La siguiente imagen muestra un ejemplo de propagación acústica cuando se tienen dos tipos de lecho marino distintos. Se observa que la propagación está altamente influenciada por las interacciones entre interfases, cambiando drásticamente la distribución de niveles de sonido en la distancia en función de las propiedades del lecho marino (ver Figura 27).

¹⁶- Enlace: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/

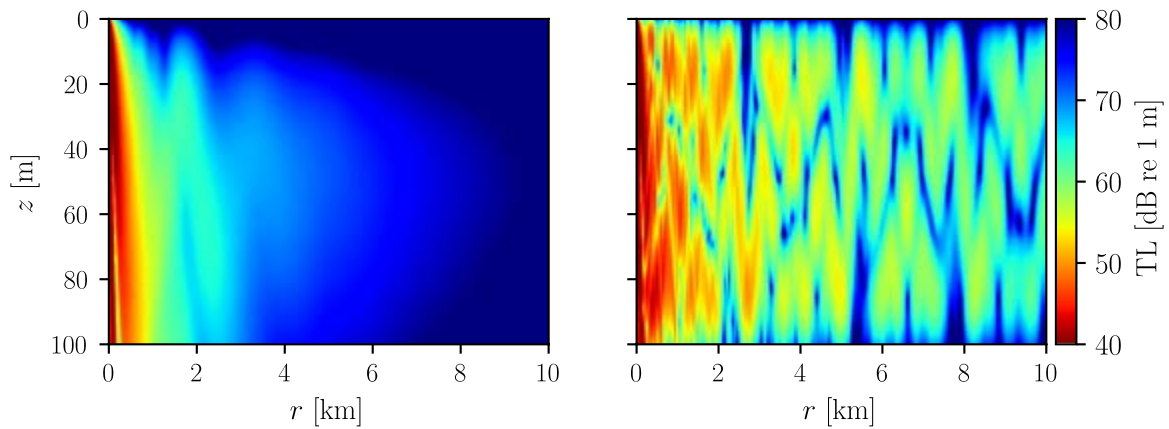


Figura 27. Comparación entre dos tipos de lechos marinos con un modelo de ecuación parabólica, para una fuente acústica a 20 m de profundidad y frecuencia de 100 Hz, y un perfil de velocidad típico de invierno en aguas someras.

Izquierda: mezcla limo-arcilla - $\rho = 1.5 \text{ g/cm}^3$, $C_L = 1515 \text{ m/s}$, $\alpha_L = 0.15 \text{ dB } \lambda^{-1}$.

Derecha: arena gruesa - $\rho = 2 \text{ g/cm}^3$, $C_L = 1800 \text{ m/s}$, $\alpha_L = 0.9 \text{ dB } \lambda^{-1}$. Simbología: ρ es la densidad del medio, C_L es la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y α_L es el coeficiente de absorción de las ondas longitudinales.

Estas variables no suelen estar disponibles directamente, pero sí otras más cualitativas, como el tipo de sustrato (arenoso, arcilloso, rocoso, etc.), o el tamaño de grano. EMODnet proporciona también este tipo de datos (en el portal de geología).

La conversión a los parámetros acústicos, que son los que los modelos necesitan, puede realizarse acudiendo a datos tabulados de artículos científicos [18, 19] o libros especializados [4, 20] que los compendien, aunque es posible que ciertos parámetros (suele ocurrir con los relativos a las ondas transversales) estén omisos. Para una revisión histórica, es interesante el artículo de Ballard y Lee [21].

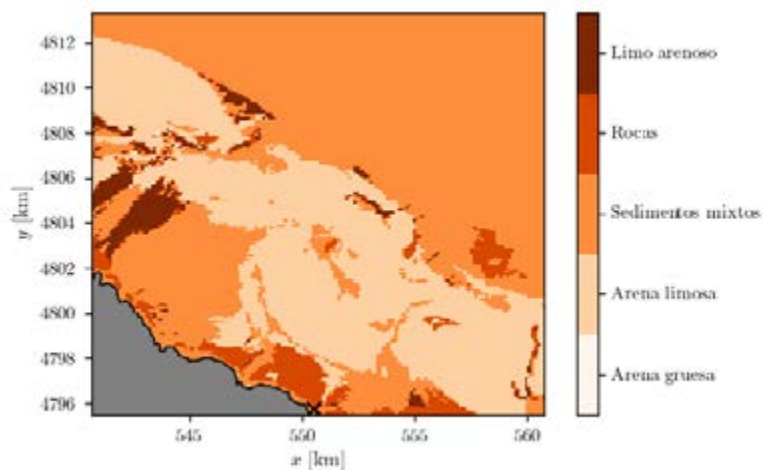


Figura 28. Tipos de lecho característicos cerca de la costa de Mutriku, en el País Vasco, a partir de datos de EMODnet Fuente: CTN.

7.1.2. Parámetros de salida

Como se ha mencionado anteriormente, el resultado más general de la implementación de un modelo de transmisión acústica es un campo bidimensional (en distancia y profundidad) de pérdidas de nivel sonoro a una determinada frecuencia, normalmente en unidades de dB re 1 m (decibelios respecto 1 metro de la fuente). Esto incluye los casos más sencillos de evaluación de las pérdidas a una determinada profundidad o distancia respecto de la fuente (o ambos casos simultáneamente), y establece la dependencia espacial de la propagación de la intensidad del sonido emitido por una fuente.

Nótese que, estrictamente, un modelo de transmisión acústica no arroja niveles de sonido absolutos, sino relativos a la fuente, por lo que no resultan útiles en la evaluación del sonido real que una determinada fuente acústica emite a su alrededor. Para transformar estos niveles a una escala absoluta es necesario conocer el nivel sonoro de la fuente (o SL, por el inglés Source Level); simplemente sumando este valor para todo el campo calculado se conseguirá el nivel absoluto de nivel de presión sonora, o SPL (del inglés Sound Pressure Level), en unidades de dB re 1 μ Pa.

7.2. Mapas de sonido

Una de las aplicaciones que a menudo se requiere de un estudio acústico de transmisión submarina es un mapa de sonido en el que se describa el campo acústico en toda una región, es decir, se quiere conocer la distribución del sonido en las tres dimensiones del espacio en un cierto entorno, por ejemplo, para evaluar la presión ambiental acústica de alguna fuente de sonido antropogénica. Básicamente, hay dos formas de proceder para obtener un campo de sonido en 3D:

1) Interpolación (Nx2D): se puede obtener un campo tridimensional mediante interpolación de los resultados correspondientes a diferentes transectos que barren el plano horizontal. Este método se conoce como Nx2D (N transectos en 2 dimensiones), y aunque es fácil de implementar, ignora la refracción horizontal de las ondas.

2) Modelo tridimensional: aunque de disponibilidad más escasa, también existen modelos que, en vez de realizar los cálculos en un transecto (plano vertical), directamente trabajan en todo el espacio.

Sea como sea, los parámetros de entrada de los modelos siguen siendo los mismos, aunque ahora tendrán que estar muestreados en toda la región de estudio, para dar cuenta de la posible¹⁷ anisotropía de estos. Por último, una vez aplicado el modelo en cuestión, faltaría transformar el TL a SPL, mediante el conocimiento del SL de la fuente estudiada. Esta parte es crítica en tanto en cuanto el campo calculado se modificará en la misma medida que el SL, y, por tanto, es ésta realmente la variable más importante a la hora de estimar el nivel absoluto de sonido. En la Figura 29 se examina esta cuestión para un caso real [22, 23].

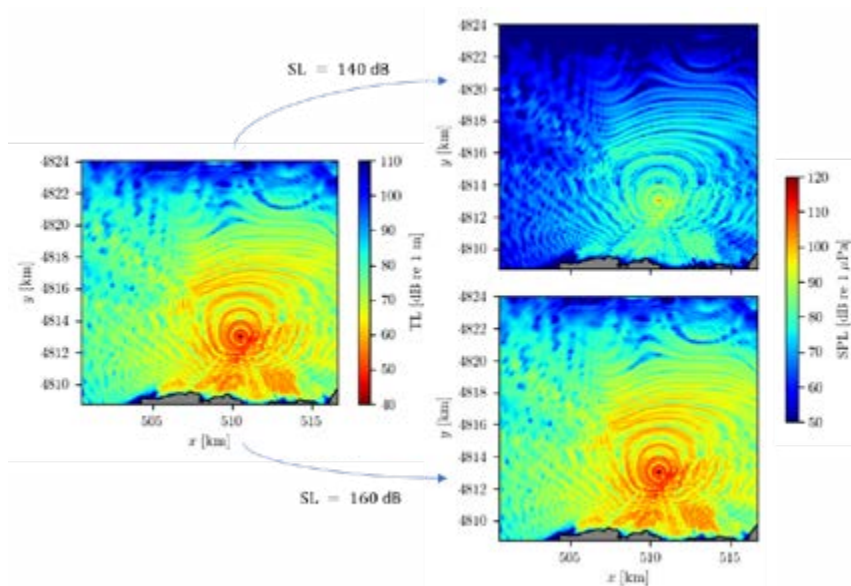


Figura 29. Izquierda: mapa polar de TL a una frecuencia de 62.5 Hz, obtenido por el método Nx2D. En este caso, se realizaron 180 transectos (caso aplicado en aguas de Bilbao). Derecha: mapas de SPL correspondientes a dos niveles de fuente que difieren en 20 dB. Fuente: CTN.

17- Algunos parámetros tendrán una mayor dependencia espacial que otros: por ejemplo, es lógico pensar que en una determinada zona del mar la batimetría variará en mayor medida que la composición del lecho marino o que el perfil de velocidades del sonido.

7.3. Ruido por tráfico marítimo

Entre los diferentes tipos de mapas de sonido, una de las aplicaciones más estudiadas en los últimos años es la de predecir el campo acústico presente en una región debido al tráfico de embarcaciones, de acuerdo con la creciente preocupación que existe acerca del ruido ambiente antropogénico en el océano.

Gracias a los avances en los sistemas de información, hoy en día están disponibles datos en tiempo real¹⁸ de embarcaciones en todos los mares del mundo, por el sistema AIS de monitorización (si bien solo aquellos barcos de más de un arqueado bruto de más 300 o barcos de pasajeros están obligados a monitorizarse).



Figura 30. Mapa global de rutas marítimas. Fuente: www.shipmap.org.

Sin duda, la parte más controvertida en estos estudios es determinar las características de las fuentes acústicas. Aunque a partir de los datos AIS se puede identificar muy bien cada barco, la asignación de los niveles de emisión acústica correspondientes solo puede ser obtenida con un grado de exactitud muy aproximado que deja un gran margen de incertidumbre en estos modelos; muestra de ello es la discrepancia entre niveles que existe en la bibliografía [24]. Por ello, se conmina al técnico a ser muy cuidadoso a la hora de definir el espectro de la fuente para cada tipo de barco.

Y es que un modelo riguroso requeriría una descripción muy detallada de las características de los barcos, incluyendo todas sus diferentes contribuciones al sonido (vibración del casco, cavitación, turbulencia generada, etc.) bajo diferentes condiciones de navegación, lo que desafortunadamente no existe para todos los diferentes tipos de barcos en la actualidad.

¹⁸- Páginas web como MarineTraffic permiten consultar datos AIS en tiempo real: <https://www.marinetraffic.com/>

Los modelos aplicables a este tipo de estudios pueden clasificarse en las dos clases siguientes:

1) Temporal: en el cual se define un paso temporal, obteniendo así una resolución temporal uniforme. En cada paso temporal, cada barco se localiza en su verdadera posición (para ello, es necesario reconstruir la trayectoria de cada barco). La pérdida de transmisión es calculada desde cada barco en un mallado tridimensional. En cada lugar de recepción, el ruido final es la suma de contribuciones de cada fuente. Con esta serie temporal se obtienen estadísticos como valores medios, percentiles, o niveles de excedencia.

2) Probabilístico: en este caso se define un mallado espacial y la distribución naval se calcula sobre estas celdas, mediante alguna métrica de densidad naval. Entonces se puede hallar la función de densidad de probabilidad (o acumulada) y sus momentos estadísticos sin producir la serie temporal de posiciones de los barcos, y finalmente, los correspondientes niveles de ruido.

A la hora de calcular la propagación del sonido desde cada barco (que se caracteriza como una fuente puntual, normalmente), se necesita acudir a algún modelo de propagación acústica submarina. Debido al gran número de embarcaciones que navegan el mar cada día (al gran número de fuentes emisoras), el procedimiento más atractivo es usar un modelo de propagación simplificado, como el modelo analítico de pérdidas por divergencia esférica (en el que $TL=20 \log(r)$), pues son muy rápidos. No obstante, no tienen en cuenta las características del entorno y arrojan, a lo sumo, una gruesa aproximación del campo de sonido real.

Utilizar un modelo numérico detallado directamente con semejante número de fuentes resulta computacionalmente extremadamente intensivo, por lo que es mandatorio realizar algunas aproximaciones extra o mejorar la implementación de los mismos (con paralelización, por ejemplo [25]). En la parte 3 del documento de 2014 del TG-NOISE de monitorización de ruido submarino en el Mediterráneo [26], se pueden encontrar numerosos ejemplos de aplicaciones de este tipo, en los que predominan los modelos analíticos de corte simplificado.

7.4. Validación con medidas in-situ

Como ha sido explicado, existe un gran número de variables que pueden afectar la precisión y exactitud de los modelos, ya sea debido a la variabilidad natural de algunas de ellas (perfil de velocidades del sonido), el poco conocimiento sobre otras (por ejemplo, características del lecho marino) así como la sensibilidad de los modelos respecto los parámetros escogidos.

La inclusión de mediciones de ruido in-situ permite validar los resultados de los modelos de propagación, asumiendo que la mayoría de los parámetros de entrada estén correctamente calibrados, por lo que es crucial. Para conocer cómo realizar las medidas de forma óptima, acúdase a los apartados 3 y 4, en los que se detallan procedimientos para realizar campañas de monitorización de ruido submarino.

8. Proyecto QUIETMED

El proyecto “QUIETMED: A joint programme on underwater noise (D11) for the implementation of the Second Cycle of the MSFD in the Mediterranean Sea¹⁹”, ha sido financiado por la Comisión Europea para apoyar la implementación de la Directiva Marco sobre la estrategia marina.

El objetivo general de este proyecto es mejorar la coordinación entre los estados miembros de la Unión Europea que comparten regiones y subregiones marinas en el Mediterráneo para incrementar el nivel de protección y estado de conservación de las especies del mar Mediterráneo frente a los daños causados por la introducción de ruido submarino producido por actividades antropogénicas.

Para ello, el proyecto se centra en mejorar el nivel de coherencia y la comparabilidad de información en relación con el seguimiento del Descriptor 11-ruido submarino, fomentando la cooperación entre los países de la cuenca mediterránea.

Este proyecto, coordinado por el Centro Tecnológico Naval y del Mar (CTN)²⁰, ha sido desarrollado por un consorcio formado por 10 entidades:



Figura 31. Consorcio del proyecto QUIETMED

19- <http://www.quietmed-project.eu/>.

20- <https://www.ctnaval.com/proyectos/quietmed/>



Figura 32. Proyectos piloto desarrollados durante el proyecto QUIETMED

Para ello, durante el proyecto se llevaron a cabo diferentes campañas de medición acústica submarina en España, Malta y Grecia.

Mediante estas experiencias piloto se estudió la comparabilidad entre diferentes equipos y sistemas de medición en diferentes localizaciones. Como resultado, se elaboraron tres guías metodológicas sobre calibración, procesamiento de señal y modelado y mapeo para mejorar la coherencia en la monitorización del ruido submarino, y en consecuencia, mejorar la implementación técnica de la Directiva marco sobre la estrategia marina en la Región Mediterránea. Estas guías son parte de la base técnica para el desarrollo del presente documento y están disponibles (en inglés) a través del siguiente enlace <http://www.quietmed-project.eu/deliverables/>:

- **D3.1.** Best practices guidelines on sensor calibration for underwater noise monitoring in the Mediterranean Sea.
- **D3.2.** Best practices guidelines on signal processing.
- **D3.3.** Best practices guidelines on acoustic modelling and mapping.

9. Referencias

- [1] E. Comisión, «Decisión (UE) 2017/848 de la Comisión, de 17 de mayo de 2017, por la que se establecen los criterios y las normas metodológicas aplicables al buen estado medioambiental de las aguas marinas, así como especificaciones y métodos normalizados de seguimiento».
- [2] R. Dekeling, M. L. Tasker, A. J. Van der Graaf, M. A. Ainslie, M. H. Andersson, M. André, J. F. Borsani, K. Brensing, M. Castellote, D. Cronin, D. Dalen, T. Folegot, T. Leaper, J. Pajala, P. Redman, S. P. Robinson, P. Sigray y Sutton, «Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas, Part II,» Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2014.
- [3] B. J. E. L. Carretta JV, «Acoustic pingers eliminate beaked whale bycatch in a gill net fishery,» Marine Mammal Science, vol. 24, pp. 956-961, 2008.
- [4] X. Lurton, An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications, Springer, 2002.
- [5] C. OSPAR, «Assessment of the environmental impact of underwater noise,» 2009.
- [6] S. P. Robinson, P. A. Lepper y R. A. Hazelwood, «Good Practice Guide No. 133,» 2014.
- [7] National Physical Laboratory, «NPL Report CMAM 034,» Middlesex, 1999.
- [8] JCGM, «Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement,» 2008.
- [9] European Accreditation, «Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration,» 2013.
- [10] I.Felis, P.Cervantes; P.Ruiz; R.Martínez; H.Er-rachdi. Nuevas técnicas de calibración de hidrófonos en baja frecuencia con relación a la MSFD, XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 2018.
- [11] S. Cui y D. W. Y. Khoo, «Underwater Calibration of Hydrophones at Very Low frequencies from 30 Hz to 2 kHz,» Journal of Physics: Conference Series, 2018.
- [12] A. Sergei y M. Yuri, «Detection of Clipped Fragments in Speech Signals,» World Acad. Sci. Eng. Technol. INT. J. Comput. Inf. Eng., vol. 8, nº 2, pp. 286-292, 2014.
- [13] F. Deng, C. Bao y F. Bao, «Clipping detection of audio signals based on Kernel Fisher Discriminant,» de 2013 IEEE China Summit and International Conference on Signal and Information Processing, Beijing, China, 2013.
- [14] G. M. Wenz, «Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources,» Journal Acoust. Soc. Am., vol. 34, nº 12, pp. 1936-1956, 1962.
- [15] R. Urick, Principles of underwater sound, Los Altos California, 2013.
- [16] R. Dekeling, M. L. Tasker, A. J. Van der Graaf, M. A. Ainslie, M. H. Andersson, M. André, J. F. Borsani, K. Brensing, M. Castellote, D. Cronin, D. Dalen, T. Folegot, T. Leaper, J. Pajala, P. Redman, S. P. Robinson, P. Sigray, G. Sutton, F. Thomsen, S. Werner, D. Wittekind y J. V. Young, «Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas, Part III,» Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2014.

- [17] M. Schulkin, «Colossus Revisited: A Review and Extension of the Marsh-Schulkin Shallow Water Transmission Loss Model,» Washington, 1962.
- [18] E. L. Hamilton, «Compressional-wave attenuation in Marine Sediments,» Geophysics, 1972.
- [19] A. C. Kibblewhite, «Attenuation of sound in marine sediments: A review with emphasis on new low-frequency data,» The Journal of the Acoustical Society of America, 1989.
- [20] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter y H. Schmidt, Computational Ocean Acoustics, Springer, 2011.
- [21] M. S. Ballard y K. M. Lee, «The acoustics of marine sediments,» Acoustics Today, (2017).
- [22] I. Felis, M. Sánchez, A. Guerrero, D. Arenas. Underwater Acoustic Impulsive Noise Monitoring in Port Facilities: Case Study of the Port of Cartagena. Sensors 2019, 19, 4672.
- [23] I. Felis, M. Sánchez, D. Arenas, P. Ruiz. Herramienta on-line para la evaluación acústica simplificada de actividades con incidencia sobre el medio marino. XV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. 2019.
- [24] QUIETMED, «D3.3 Best practice guidelines on acoustic modelling and mapping,» 2018.
- [25] T. Folegot, D. Clorennec, R. Chavanne y R. Gallou, «Mapping of ambient noise for BIAS. Quiet-Oceans technical report QO.20130203.01.RAP.001.01B,» Brest, 2016.
- [26] R. Dekeling, M. L. Tasker, A. J. Van der Graaf, M. A. Ainslie, M. H. Andersson, M. André, J. F. Borsani, K. Brensing, M. Castellote, D. Cronin, D. Dalen, T. Folegot, T. Leaper, J. Pajala, P. Redman, S. P. Robinson, P. Sigray y G. Sutton, «Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas Part III: Background information and Annexes,» Joint Research Centre of the European Commission, Luxembourg, 2014.
- [27] S. P. Robinson, P. D. Theobald, G. Hayman, L. S. Wang, P. A. Lepper, V. Humphrey y S. Mumford, «Measurement of underwater noise arising from marine aggregate dredging operations,» Marine Aggregate Levy Sustainability Fund, 2011.
- [28] A. S.-2. (R2020), «Procedures For Calibration of Underwater Electroacoustic Transducers,» 2020.
- [29] J. Warren, M. Ainslie, B. Miksis-Olds, y K. Heaney, «ADEON Calibration and Deployment Good Practice Guide. Version 1.0 Technical report by Stony Brook University for ADEON Prime Contract No. M16PC00003,» 2018.
- [30] M. Ainslie, J. Miksis-Olds, M. K. Heaney, C. de Jong, A. von Brenda-Beckmann y A. Lyons, «ADEON Underwater Soundscape and Modelling Metadata Standard. Version 1.0 Technical report by JASCO Applied Sciences for ADEON Prime Contract No. M16PC0003,» 2018.
- [31] C. Martin B. C. Hillis, J. Miksis-Olds, M. Ainslie, J. Warren y K. Heaney, «Hardware Specification. Document 01412, Version 2.3 Technical Report by JASCO Applied Sciences for ADEON,» 2018.
- [32] O. Commission, «OSPAR inventory of measures to mitigate the emission and environmental impact of underwater noise,» Human Activities, vol. 626, 2014.

