



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Evaluación del ruido submarino producido por dragados en
puertos de poco calado

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación, Sonido e
Imagen

AUTOR/A: Izquierdo Núñez, Claudia

Tutor/a: Espinosa Roselló, Víctor

Cotutor/a externo: Aguilera de Maya, Juan Luis

Director/a Experimental: Lloret Gaona, Álvaro

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Agradecimientos

A Manu y Álvaro.

A Víctor.

A Acusttel.

A papi y a mami.

Y siempre a Vic.

Hasta los huesos.

Resumen y palabras clave

La predicción del ruido submarino generado por las actividades humanas es un aspecto para implementar en los proyectos de evaluación de impacto ambiental cuando estas tienen lugar en el medio marino o en las infraestructuras costeras. Una de las actividades más comunes es el dragado. Esta práctica supone la generación de ruido continuo de baja frecuencia, que puede propagarse a grandes distancias en el medio acuático. En este sentido, la modelización de las pérdidas por transmisión para este problema en aguas someras se enfrenta a las limitaciones de los métodos de simulación rayos y la complejidad de adaptarlo a tres dimensiones.

En este trabajo, se realizará una revisión de la literatura sobre el dragado como fuente de ruido submarino, así como los métodos y el *software* disponible para la simulación de propagación, haciendo un especial énfasis en el *software* libre. Tomando como objeto de estudio el puerto de Gandía, se resolverá un caso práctico de dragado. Para ello, se compararán los resultados numéricos obtenidos gracias al método de simulación por rayos Bellhop con las medidas experimentales de las pérdidas por transmisión realizadas en el puerto a través de un hidrófono y un altavoz submarino.

Palabras clave: ondas, acústica, ruido submarino, dragado, simulación.

Abstract and key words

The prediction of underwater noise generated by human activities is an aspect to be implemented in environmental impact assessment projects when these take place in the marine environment or in coastal infrastructure. One of the most common activities is the dredging of docks to facilitate the navigability of ports. Dredging involves the generation of continuous low-frequency noise, which can propagate over long distances in the aquatic environment. Modelling transmission losses for such a shallow water problem is confronted with the limitations of ray methods. In this work, a review of the literature on dredging as a source of underwater noise will be carried out, and the methods and software available for simulating propagation in shallow waters, with special emphasis on free or open-source software. Taking the port of Gandia dock as a case study, a practical case of dredging at a point in it will be solved, comparing the numerical results obtained with the ray-tracing method with experimental measurements of transmission losses carried out using an underwater loudspeaker and an autonomous hydrophone located at different points in the harbour.

Key words: waves, acoustics, underwater noise, dredging, simulation.

Índices

Índice general

Agradecimientos	1
Resumen y palabras clave	2
Abstract and key words	2
Índices	3
Índice general	3
Índice de imágenes	4
Índice de tablas	4
Índice de gráficas	4
1. Antecedentes	6
2. Introducción	8
3. Objetivos	9
4. Metodología y etapas	9
5. Marco teórico	10
Cálculo de la intensidad acústica y la pérdida de transmisión	12
5.1. Modelos de propagación	13
5.1.1. Teoría de modelado de rayos	13
5.2. Algoritmo BELLHOP	15
5. Legislación y normativas	18
6. Desarrollo y resultados del trabajo	20
6.1. Medidas en el Puerto de Gandía	20
Sistema de emisión	20
Sistema de recepción	20
6.1.1. Medida 1 (16/06/24)	22
Descripción de la medida 1	22
6.1.2. Medida 2 (03/07/24)	24
Descripción de la medida 2	24
6.2. Resultados de las medidas	25
6.3. Resultados de la simulación	37
7. Conclusiones	48
8. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030	49
9. Referencias	51

Índice de imágenes

Imagen 1: Puerto de Gandía [Img.1]	6
Imagen 2: Propuesta de ampliación del Puerto de Gandía. [Img.2].....	7
Imagen 3: Principio de la potencia dentro de un tubo de rayos permanece constantemente dentro de ese tubo de rayos. [Img.3].....	12
Imagen 4: Propagación desde una fuente a 25 m de profundidad sobre un fondo suavemente ondulado y ascendente en aguas del norte. [Img.4].....	15
Imagen 5: Fichero '.bty' – BELLHOP.....	18
Imagen 6: Batimetría Puerto de Gandía.....	18
Imagen 7: Lubell VC2C Underwater Acoustic Transducer.....	20
Imagen 8: Montaje del emisor.....	20
Imagen 9: Urec384K.....	21
Imagen 10: Osciloscopio, amplificador y fuente;	21
Imagen 11: Grúa para sumergir el hidrófono;	21
Imagen 12: Hidrófono Brüel & Kjaer.....	21
Imagen 13: Samaruc.....	21
Imagen 14: Puntos de referencia, emisión y recepción	22
Imagen 15: Montaje para la medida de referencia	23
Imagen 16: Punto 1, Pantalán UPV	23
Imagen 17: Punto 2, Llotja de Gandía.....	23
Imagen 18: Punto 3, enfrente Tinglado 5	24
Imagen 19: Posicionamiento puntos de medida final	24
Imagen 20: Punto 4, Parquin puerto.	25
Imagen 21: Absorción a 125Hz	29
Imagen 22: Absorción a 63Hz	29

Índice de tablas

Tabla 1: Efectos del ruido submarino en la fauna marina	8
Tabla 2: Fichero '.env' - BELLHOP.....	17
Tabla 3: Resultados de medidas	37
Tabla 4: Pérdidas por transmisión medidas y simuladas a 63Hz.....	48
Tabla 5: Pérdidas por transmisión medidas y simuladas a 125 Hz.....	48
Tabla 6: Objetivos de desarrollo sostenible.	50

Índice de gráficas

Gráfica 1: Medida 1 - Nivel de emisión a 125Hz	26
Gráfica 2: Medida 1 - Nivel de emisión a 63HZ.....	26
Gráfica 3: RL125hz - PUNTO 3.....	30
Gráfica 4: RL 126 Hz– PUNTO 3	30
Gráfica 5: TL125hz - PUNTO 3.....	30
Gráfica 6: RL 126 Hz– PUNTO 3	30
Gráfica 7: RL125hz - PUNTO 1.....	33
Gráfica 8: RL 126 Hz– PUNTO 1	33
Gráfica 9: TL125hz– PUNTO 1	34
Gráfica 10: RL 126 Hz– PUNTO 1	34
Gráfica 11: RL125hz - PUNTO 4.....	36

Gráfica 12: RL 126 Hz– PUNTO 4	36
Gráfica 13: TL125hz – PUNTO 4	37
Gráfica 14: RL 126 Hz – PUNTO 4	37
Gráfica 15: Simulación coherente – TL 3m – 63Hz	39
Gráfica 16: Simulación coherente – TL 5m – 63Hz	39
Gráfica 17: Simulación coherente – 10 m – 63Hz	40
Gráfica 18: Simulación semicoherente – 3 m – 63Hz.....	40
Gráfica 19: Simulación semicoherente – 5 m – 63Hz.....	41
Gráfica 20: Simulación semicoherente – 10 m – 63Hz.....	41
Gráfica 21: Simulación incoherente – TL 3m – 63Hz.....	42
Gráfica 22: Simulación incoherente – TL 5m – 63Hz.....	42
Gráfica 23: Simulación incoherente – TL 10m – 63Hz.....	43
Gráfica 24: Simulación coherente – TL 3m – 125Hz	43
Gráfica 25: Simulación coherente – TL 5m – 125Hz	44
Gráfica 26: Simulación coherente – TL 10m – 125Hz	44
Gráfica 27: Simulación semicoherente – TL 3m – 125Hz.....	45
Gráfica 28: Simulación semicoherente – TL 5m – 125Hz.....	45
Gráfica 29: Simulación semicoherente – TL 10m – 125Hz.....	46
Gráfica 30: Simulación incoherente – TL 3m – 125Hz.....	46
Gráfica 31: Simulación incoherente – TL 5m – 125Hz.....	47
Gráfica 32: Simulación incoherente – TL 10m – 125Hz.....	47

ANEXOS: en la carpeta adjunta “Ficheros Adjuntos .zip”

Si no puede acceder a la carpeta adjunta, todo el contenido está visible en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/drive/folders/1hcXz_a4Qu2f6hZVMOt2loIHSfjFgo32x?usp=sharing

1. Antecedentes

El puerto de Gandía está situado en la costa valenciana dentro del término municipal de Gandía. Más concretamente está en la desembocadura del barranco de San Nicolás con uno de sus extremos en la desembocadura del río Serpis y el otro en la playa de Gandía.



Imagen 1: Puerto de Gandía [Img.1]

En la *Propuesta de delimitación de los espacios y usos portuarios (DEUP*, de ahora en adelante) *del puerto de Gandía* (2020), existe un plan estratégico de Valenciaport¹. En él, se establecen tres objetivos alcanzables durante los próximos años:

- *Consolidar Valenciaport como la principal entrada y salida interoceánica de la Península Ibérica.*
- *Convertirlo en el distribuidor regional y plataforma logística intermodal líder del Mediterráneo.*
- *Disponer de capacidad para atender un tráfico de 68 millones de toneladas y cuatro millones de TEUs².*

Para poder cumplirlos, la Autoridad Portuaria de Valencia consideró ampliar el espacio portuario, teniendo como prioridad respetar al máximo el medio ambiente con el fin de cubrir las necesidades de capacidad para atender el tráfico previsto. Además, se persigue la combinación de los servicios que actualmente ofrece el puerto con otros usos complementarios compatibles con su situación geográfica, así como su alineación con el desarrollo turístico y las necesidades del entorno. Finalmente, se tiene como objetivo la creación de una instalación deportiva con capacidad suficiente para absorber la demanda de puestos de amarre en los próximos 15 años y de una nueva terminal en la zona comercial del puerto.

Los criterios específicos, recogidos por la DEUP (2020), que se han seguido en su diseño son, de forma sintética, los siguientes:

¹ Valenciaport es el nombre comercial de la Autoridad Portuaria de Valencia (APV). Es el organismo público encargado de gestionar los puertos de Valencia, Sagunto y Gandía.

² TEU es un acrónimo que viene del inglés “Twenty-foot Equivalent Unit” y corresponde a una unidad de medida utilizada en el comercio exterior para calcular la capacidad de carga de los contenedores. Fuente: <https://web.splogistics.com/blog/post/594/que-es-un-teu-y-para-que-se-usa>

- *Diseño de una dársena³ interior con capacidad para más de 800 puestos de amarre permanentes para embarcaciones deportivas de hasta 30 metros de eslora.*
- *Incorporación de una zona técnica de servicio a la embarcación con marina seca que permita el almacenaje en seco de embarcaciones de hasta 8 m de eslora.*
- *Creación de una nueva terminal asociada a un nuevo muelle comercial.*

De esta manera, se situarían las actividades comerciales en la zona sur del puerto ya que actualmente esa zona tiene las instalaciones más importantes destinadas a este uso. La zona norte, en cambio, tendrá un uso náutico-deportivo. Así pues, se aprovecharía la proximidad a la Playa de Gandía y al Real Club Náutico existente. Para ello, se construiría un nuevo contradique de 550 metros de longitud y seguidamente un nuevo muelle de 227 metros colocado de forma perpendicular al actual muelle del Serpis. Esto generará una nueva explanada de unas 4.86 hectáreas de superficie entre el nuevo muelle y el contradique. La ampliación también comprende el dragado de la dársena del Serpis y del canal de acceso. En la *Imagen 2* se puede observar lo que se pretende construir.

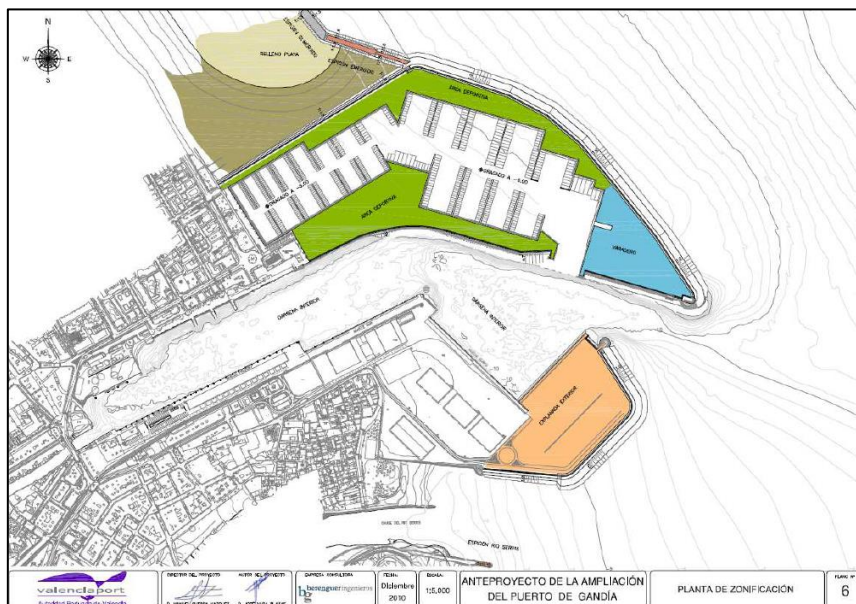


Imagen 2: Propuesta de ampliación del Puerto de Gandía. [Img.2]

Dado que este tipo de actividades de reforma y ampliación son más o menos recurrentes en distintos puertos nacionales e internacionales, se plantea cómo afectará esta reforma al medio marino.

³ Dársena: Parte de un puerto resguardada artificialmente y adecuada para el fondeo y la carga y descarga de embarcaciones. (definición rae)

2. Introducción

El fondo marino es cambiante y el de los puertos no es ajeno a este cambio. El movimiento es algo que ocurre progresivamente a causa de las mareas, el oleaje, las corrientes, el viento, la entrada y salida de barcos, etc. Esto se ve reflejado normalmente en la aparición de dunas y valles submarinos, hecho que pone en riesgo tanto la operatividad como la seguridad en la navegación de los barcos, por lo que se procede al dragado para remover el material del lecho marino (2015). Dicha actividad es utilizada, sobre todo, para la ampliación o la ejecución de nuevas infraestructuras, así como la mejora de las condiciones del tránsito portuario (2017). [7]

No obstante, el dragado emite durante las operaciones un sonido continuo de banda ancha, principalmente de baja frecuencia. Existen estudios de emisión de banda ancha de 185 y 172 dB re 1 μ Pa @ 1 m (WDCS, 2003) en los que se registraron niveles de fuente de casi 180 dB re 1 μ Pa @ 1 m para las bandas de tercio de octava alrededor de los 100 Hz (Richardson *et al.*, 1995). [11] En este sentido, y como se discutió en el Protocolo y Convenio de Londres sobre la protección del medio marino de la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias [12], las actividades de dragado son la principal fuente de vertidos permitidos en el mar y son también una fuente de ruido antropogénico.

Hay que tener en cuenta que existen muchísimos más ruidos submarinos, los cuales pueden ser no solo antropogénicos, sino también naturales. Algunos son los ruidos causados por los movimientos tectónicos, los producidos por el tráfico marítimo, actividades militares, los sónares o los producidos por los propios mamíferos marinos, peces y otros organismos marinos. Todos estos ruidos afectan de distinta manera a la fauna marina. En la *Tabla 1* clasificamos algunos de ellos:

Fisiológicos	No auditivos - Daño en los tejidos corporales - Posible inducción de embolismo gaseoso - Posible inducción de embolismo graso
	Auditivos - Daño grave al sistema auditivo - Pérdida auditiva permanente - Pérdida auditiva temporal
De conducta	De comportamiento - Desorientación y varamientos - Interrupción de hábitos normales como alimentación reproducción o amamantamiento - Variación adaptativa de la vocalización, en intensidad y/o frecuencia - Abandono del área de corto o largo plazo
	De percepción - Enmascaramiento de la comunicación entre conespecíficos - Enmascaramiento de otros sonidos biológicos de importancia.

Fuente: Convención para la Protección del Medio Ambiente Marino del Atlántico del Nordeste (QSPARI), 2009

Tabla 1: Efectos del ruido submarino en la fauna marina

3. Objetivos

Atendiendo a lo anterior, en el presente trabajo se establece como objetivo la evaluación del ruido submarino que causarían las actividades de dragado dentro de un puerto de poco calado. Dadas las facilidades por la ubicación geográfica en la que nos encontramos, lo centraremos en el puerto de Gandía.

Así pues, será necesario conocer cómo se comportan las ondas acústicas en el agua, por lo que se realizarán diferentes simulaciones de este comportamiento aplicando las características del ruido de dragado y del puerto. Para ello, usaremos herramientas de simulación del campo acústico submarino proporcionadas por la U.S. Office of Naval Research en su repositorio *Acoustics Toolbox* y, en particular, el método de simulación Bellhop (2023) [13] para trazado de rayos disponible en el mismo. Finalmente, para verificar los modelos numéricos y conocer realmente en qué entorno acústico nos encontramos se realizarán medidas submarinas *in situ* en el puerto de Gandía.

Todos los resultados se compararán con las recomendaciones o directrices que marcan las distintas leyes y, a su vez, con los Objetivos de Sostenibilidad que tiene la Agenda 2030.

4. Metodología y etapas

El procedimiento que se llevará a cabo para la realización del trabajo comenzará con la documentación sobre aspectos clave acerca de la acústica marina y los tipos de ruido subacuático. También será necesario obtener características del puerto de Gandía como, por ejemplo, la batimetría, la temperatura, la salinidad...

Una vez aclarada esta parte, procederemos a desarrollar los modelos teóricos. Existen distintos de modelos de propagación de sonido debajo del mar. Entre ellos destacan las teorías de rayos, los modelos de ondas y las ecuaciones paramétricas. Nos centraremos en el primero de ellos aplicándolo a través del modelo de Bellhop. De esta manera, obtendremos las pérdidas por transmisión (Transmission Loss, TL), por lo que podremos averiguar la intensidad de sonido que existe en el receptor. Por otro lado, en el puerto de Gandía mediremos los niveles de fuente y los niveles recibidos en diferentes posiciones, que aparecerán detalladas en apartados posteriores. El objetivo de esto es comparar el modelo teórico con el real y poder calibrar, así, el modelo teórico realizado. Por último, una vez tengamos los datos que deseamos, los analizaremos y evaluaremos respecto a las recomendaciones legales.

Con todo esto, pretendemos conseguir un informe objetivo de qué niveles de ruido obtendríamos si se hicieran actividades de dragado en el puerto de Gandía, que, como hemos anticipado en el apartado § 1, es algo que está previsto que se dé.

En relación con la metodología que se seguirá, el proyecto se puede dividir en cuatro etapas principales:

- Etapa 1: fase de documentación. Aquí se recopilará toda la información teórica necesaria para poder llevar a cabo las posteriores fases.
- Etapa 2: fase de simulación. Aplicación de los modelos teóricos para la simulación.
- Etapa 3: medidas *in situ*. Realización de las medidas de niveles de fuente y de niveles recibidos en diferentes posiciones. Se realizan en el puerto de Gandía.

- Etapa 4: valoración de los resultados obtenidos. Se analizarán los datos para obtener unos resultados y unas conclusiones de ellos.

5. Marco teórico

El sonido es la propagación de cualquier perturbación mecánica, en forma de ondas, de una oscilación en la presión, a través de un fluido u otro medio elástico que esté generando el movimiento vibratorio de un cuerpo. La propagación del sonido involucra transporte de energía sin transporte de materia, en forma de ondas mecánicas que se propagan a través de la materia sólida, líquida y gaseosa (2017) [12]. Concretamente, en el mar, la **velocidad del sonido** (c) suele estar entre el rango de 1450 y 1540 m/s.

El cálculo de la velocidad de sonido en el mar en los estudios de impacto ambiental se puede realizar con la expresión propuesta por Medwin:

$$c = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,010T)(S - 35,0) + 0,016z \quad (5:1)$$

Donde tenemos las variables de temperatura T ($^{\circ}C$), salinidad S (g/kg) y presión, que es proporcional a la profundidad z (m). El valor de c se obtiene en m/s.

Esta ecuación es válida para los siguientes rangos de temperatura, salinidad y profundidad:

$$0 \leq T \leq 35^{\circ}C \quad (5:2)$$

$$0 \leq S \leq 45 \frac{g}{kg} \quad (5:3)$$

$$0 \leq z \leq 1000 m \quad (5:4)$$

El **nivel de fuente** (SL) es el nivel con el que la fuente de sonido irradia una señal. La intensidad de sonido se reduce por **pérdida de transmisión** (TL) cuando el sonido se desplaza desde la fuente al receptor. Por lo tanto, la **intensidad de sonido en el receptor** (RL) es:

$$RL(dB) = SL(dB) - TL(dB) \quad (5:5)$$

A medida que los rayos acústicos avanzan, van disminuyendo gradualmente su intensidad debido a la pérdida de energía a lo largo de su trayectoria (absorción). La cantidad de energía absorbida está vinculada a la longitud de onda de la señal. En general, las frecuencias más bajas, que corresponden a longitudes de onda más largas, tienden a interactuar menos con las moléculas de agua, más bien las "mecen", lo que resulta en una menor pérdida de energía por absorción. La siguiente fórmula describe las pérdidas debido a la divergencia y la absorción:

$$TL(dB) = N \cdot \log(R) - \alpha \cdot R \quad (5:6)$$

Siendo:

N , el coeficiente de atenuación. Toma el valor de 20 para pérdida por transmisión esférica y 10 para cilíndrica.

α , para el coeficiente de absorción del ruido en el agua, superficie y fondo en $dB \cdot m^{-1}$. Una aproximación es $0.036 \cdot f^{1,5}$, donde f es la frecuencia en kHz .

R , la distancia entre la fuente y el receptor

Aunque las frecuencias bajas apenas experimentan pérdida de energía debido a la absorción, todos los sonidos enfrentan una pérdida por divergencia. Esta pérdida ocurre porque la energía que inicialmente está concentrada en un punto de emisión se dispersa a medida que se propaga, resultando en una disminución de la intensidad en cada punto de recepción, ya que se distribuye en un área más grande.

Teniendo en cuenta que hay tres tipos de divergencia: plana, cilíndrica y esférica, en un medio homogéneo (con las mismas propiedades físicas en todos los puntos) e isotrópico (con las mismas propiedades de propagación en todas las direcciones), la propagación del sonido es **esférica**, lo cual se asume en el caso de **aguas profundas** en el mar. Una propagación esférica implica que la intensidad disminuye 6 dB cada vez que se dobla la distancia desde la fuente emisora. Por tanto, la pérdida por transmisión se calcula de la siguiente manera:

$$TL_{esférica} = 20 \cdot \log\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (5:7)$$

Siendo:

$$R < R_1$$

R la distancia desde la fuente al receptor,

R_1 la profundidad

R_0 la referencia, normalmente a 1m

En medios no homogéneos, como las **aguas someras**⁴, la señal experimenta una propagación **cilíndrica**. Ello implica que la pérdida de intensidad es de 3 dB cada vez que se dobla la distancia. En el caso de propagación cilíndrica las pérdidas por transmisión se calculan con la siguiente fórmula:

$$TL_{cilíndrica} = 20 \cdot \log R_1 + 10 \cdot \log\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (5:8)$$

Siendo:

$$R < R_1$$

R la distancia desde la fuente al receptor,

R_1 la profundidad

R_0 la referencia, normalmente a 1m

La batimetría y el tipo de sustrato del fondo influyen en la propagación del sonido. Por ejemplo, la arena refleja mejor el sonido que el fango, el limo o la grava. La formulación siguiente incluye estos parámetros

$$TL = 15 \cdot \log R + 5 \cdot \log\left(\frac{\eta \cdot H}{\pi \cdot R_{ref}}\right) \quad (5:9)$$

Siendo:

η , el gradiente de pérdida de reflexión

H , la profundidad

$R_{ref} = 1m$

$N=15$ Coeficiente de atenuación (Dekeling *et al*, 2014).

Cuando el medio no es uniforme, la velocidad de avance del frente de onda varía entre diferentes puntos, alterando su forma general. Esta variación conlleva un cambio en la dirección de los rayos acústicos: si la variación de la velocidad del sonido es gradual,

⁴ Se denominan aguas someras aquellas que son poco profundas.

los rayos se curvan; si es abrupta, como en el caso de una picnoclina⁵ en el fondo marino o en la superficie del agua, los rayos se quiebran. Este fenómeno se conoce como refracción.

En condiciones donde la velocidad del sonido, c , es ligeramente mayor en un lado del rayo que en el otro, cerca de cualquier punto a lo largo de un plano vertical, la trayectoria se curva suavemente hacia el lado de menor velocidad. Esta desviación se llama refracción continua.

La posición y la forma exactas del rayo están determinadas por el punto de emisión, el ángulo de incidencia inicial y el gradiente de la velocidad del sonido. Si la velocidad aumenta constantemente con la profundidad, los rayos se curvan hacia arriba (disminuyendo el ángulo de incidencia), y viceversa. Por lo tanto, para ángulos de incidencia iniciales pequeños, los rayos no alcanzarán el fondo marino (si la velocidad aumenta) o la superficie del agua (si la velocidad disminuye).

Cuando los rayos alcanzan el fondo marino, se produce una considerable pérdida de energía. Por esta razón, los rayos que no llegan al fondo pueden viajar distancias muy largas, incluso de cientos o miles de kilómetros, especialmente con ondas de baja frecuencia, donde la absorción en el agua es mínima. A las capas de agua que pueden conducir rayos acústicos sin tocar el fondo se les llama canales sonoros.

Cálculo de la intensidad acústica y la pérdida de transmisión

La *Imagen 3* ilustra el principio de cómo la energía irradiada en un tubo estrecho permanece dentro del tubo y muestra dos rayos con una separación de ángulo vertical de $d\theta_0$ que define un tubo de rayos centrado en el ángulo inicial θ_0 . El ancho del tubo de rayos es dL con componentes incrementales dz en vertical y dr en rango

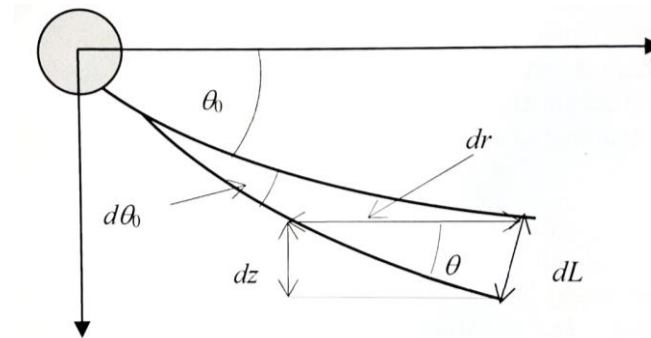


Imagen 3: Principio de la potencia dentro de un tubo de rayos permanece constantemente dentro de ese tubo de rayos. [Img.3]

La referencia para la intensidad es I_0 está a una distancia r_0 de la fuente. Teniendo en cuenta la simetría cilíndrica sobre el eje z , la potencia ΔP_0 dentro del ángulo estrecho $d\theta_0$ es

$$\Delta P_0 = I_0 2\pi r_0^2 \cos\theta_0 d\theta_0 \quad (5:10)$$

⁵ La picnoclina es una capa en la columna de agua en los océanos donde se produce un cambio rápido de densidad con respecto a la profundidad. Al igual que la termoclina (que se refiere al cambio rápido de temperatura), la picnoclina marca una transición abrupta en la densidad del agua (2023). ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

La distancia horizontal es r . En términos de la sección transversal perpendicular dL del tubo de rayos la potencia es

$$\Delta P = I 2 \pi r d L \quad (5:11)$$

Dado que la potencia en el tubo de rayos no cambia, las ecuaciones (5:10) y (5:11) son iguales, dando la proporción de las intensidades.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{r_0^2 \cos \theta_0}{r \cos \theta} \left| \frac{d\theta_0}{dz} \right| = \frac{r_0^2}{r} \frac{c_0}{c} \left| \frac{d\theta_0}{dz} \right| \quad (5:12)$$

Con referencia de distancia r_0 , las pérdidas por transmisión TL se pueden expresar como:

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{r}{r_0^2} \right) + 10 \log_{10} \left| \frac{dz}{d\theta_0} \right| + 10 \log_{10} \left(\frac{c_0}{c} \right) \quad (5:13)$$

La pérdida de transmisión tal y como se define en la ecuación (5:13) incluye la pérdida de propagación geométrica, pero la pérdida de absorción debe incluirse por separado. La pérdida por transmisión geométrica consta de dos partes. El primer término representa la propagación horizontal del tubo de rayos y da como resultado una pérdida de propagación cilíndrica. El segundo y tercer término representan la extensión vertical del tubo de rayos causada por el gradiente de profundidad de la velocidad del sonido. El tercer término generalmente se puede ignorar, ya que las variaciones de la velocidad del sonido son pequeñas en el contexto del cálculo de la intensidad.

5.1. Modelos de propagación

Siguiendo a Hovem y Dong (2019), los primeros modelos que se desarrollaron utilizaban la técnica del trazado de rayos, un precedente de la familia de técnicas que ahora se conoce como soluciones basadas en la **teoría de rayos**. Posteriormente, se desarrolló una técnica diferente para resolver problemas en aguas someras, que utilizaba lo que hoy se conoce como modos normales, entonces se la denominó solución basada en la teoría de ondas, como contraposición a la teoría de rayos. Aunque existen muchos modelos de propagación en el medio oceánico profundo, no todos son válidos en aguas poco profundas con amplias interacciones con el fondo. A bajas frecuencias, las propiedades geoacústicas del fondo no pueden ignorarse, ya que la pérdida de propagación suele estar dominada por la conversión de ondas de cizalladura y requiere conocimientos también sobre la propagación de ondas en sólidos. [8]

5.1.1. Teoría de modelado de rayos

La teoría de rayos es una técnica matemática que nos permite resolver problemas de física de ondas de una manera aproximada, pero correcta y con la precisión suficiente como para que sea útil. Se le identifica con la óptica geométrica, ya que las soluciones que se obtienen mediante su uso coinciden con ésta. La idea central de la teoría es la de “rayo” (1997). [9]

Para **teoría de la acústica de rayos** seguimos un enfoque basado en la Ley de Snell, que se expresa mediante el parámetro de rayo ξ .

$$\xi = \frac{\cos \theta(z)}{c(z)} = \frac{\cos \theta_0}{c_0} \quad (5.1.1:1)$$

Cuando la velocidad del sonido varía con la profundidad, el ángulo del rayo θ es una función de la profundidad según la Ley de Snell. Tomando la derivada de la ecuación (5.1.1:1) con respecto a la profundidad z se obtiene el radio de curvatura del rayo en la profundidad z .

$$R(z) = \frac{ds}{d\theta} = -\frac{c(z)}{\cos\theta(z)} \frac{1}{g(z)} = \frac{1}{\xi g(z)} \quad (5.1.1:2)$$

Donde $g(z)$ es el gradiente de velocidad del sonido dado por:

$$g(z) = \frac{dc(z)}{dz} \quad (5.1.1:3)$$

En cualquier punto del espacio, la curvatura del rayo está determinada por el parámetro de rayo ξ y el valor local del gradiente de velocidad del sonido $g(z)$. El signo del gradiente determina si la trayectoria del rayo se curva hacia abajo o hacia arriba. La siguiente aproximación es la suposición de isotropía transversal (TI), lo que significa que la velocidad del sonido puede variar con la profundidad z y el alcance r , pero no con el azimut.

El algoritmo también se puede utilizar cuando la batimetría varía con el alcance, sin embargo, en ese caso, el parámetro de rayo ξ ya no es constante, sino que cambia cuando el rayo golpea el fondo; la cantidad de cambio depende del ángulo de inclinación local.

En consecuencia, después de que el rayo se refleje, su parámetro de rayo debe cambiar de ξ_{in} a ξ_{out} , lo cual se expresa como:

$$\begin{aligned} \xi_{out} &= \frac{\cos(\theta_{out})}{c} = \frac{\cos(\theta_{in} + 2\alpha)}{c} \\ &= \xi_{in} \cos(2\alpha) - \frac{\sqrt{1 - \xi_{in}^2 c^2}}{c} \sin(2\alpha) \end{aligned} \quad (5.1.1:4)$$

Para calcular las coordenadas de un rayo que comienza en el punto (r_1, z_1) con el ángulo θ respecto a las coordenadas del punto en movimiento en (r_2, z_2) a lo largo de la trayectoria del rayo, la distancia horizontal es entonces:

$$r_2 - r_1 = \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{\tan\theta(z)} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\cos\theta(z) dz}{\sqrt{1 - \cos^2\theta(z)}} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\xi c(z) dz}{\sqrt{1 - \xi^2 c^2(z)}} \quad (5.1.1:5)$$

El tiempo de viaje entre los dos puntos se obtiene mediante la integración de la cantidad $1/c$, la inversa de la velocidad del sonido, a lo largo de la trayectoria del rayo:

$$\tau_2 - \tau_1 = \int_{z_1}^{z_2} \frac{ds}{c(s)} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{c(z)\sin\theta(z)} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{c(z)\sqrt{1 - \xi^2 c^2(z)}} \quad (5.1.1:6)$$

Las trayectorias de rayos, que se calculan de manera estándar dividiendo la columna de agua en muchas capas delgadas, cada una con una velocidad del sonido y un gradiente de velocidad del sonido, se derivan de bases de datos o mediciones CTD oceanográficas. Esto da como resultado trayectorias de rayos compuestas por segmentos circulares. El uso repetido de las ecuaciones (5.1.1:5) y (5.1.1:6) proporciona la trayectoria y el tiempo de viaje de cualquier rayo que comience en el origen con la profundidad z_0 y el ángulo inicial θ_0 . Manteniendo un registro de todos los puntos de

reflexión y giro, este procedimiento es relativamente fácil de implementar y da como resultado una imagen satisfactoria de cómo se propagan los rayos en el espacio.

La *Imagen 4* muestra un ejemplo de escenario con propagación acústica desde una fuente a 25 metros de profundidad sobre un fondo ligeramente ondulado con una pendiente promedio de 2.3 grados y un perfil de velocidad del sonido típico para aguas del norte. Las densidades de rayos dan una impresión de las intensidades del sonido. En este ejemplo, la intensidad más alta se encuentra en haces desde la fuente hacia el fondo a aproximadamente 2.6 km y los rayos reflejados hacia arriba hacia la superficie. La mayoría de los otros rayos experimentan múltiples reflexiones, lo que resulta en longitudes de trayectoria más largas y mayores pérdidas por reflexión.

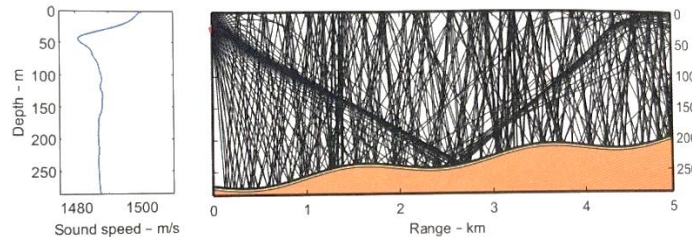


Imagen 4: Propagación desde una fuente a 25 m de profundidad sobre un fondo suavemente ondulado y ascendente en aguas del norte. [Img.4]

Crucial para la precisión del modelado es la elección de los ángulos iniciales y la densidad de muestras de profundidad del perfil de velocidad del sonido. Típicamente, el espaciado entre profundidades debe ser inferior a un metro. Para mayor claridad, en la Imagen 4 solo se utilizan unos pocos rayos; en la práctica se utilizan muchos más.

5.2. Algoritmo BELLHOP

BELLHOP es un modelo de trazado de haces para predecir campos de presión acústica en entornos oceánicos. La estructura de trazado de haces da lugar a un algoritmo especialmente sencillo. Se implementan varios tipos de haces, incluidos haces gaussianos y en forma de sombrero, con leyes de propagación tanto geométricas como físicas. BELLHOP puede producir una gran variedad de resultados útiles, como pérdidas de transmisión, rayos propios, llegadas y series temporales de recepción. Permite la dependencia del alcance en los límites superior e inferior (altimetría y batimetría), así como en el perfil de velocidad del sonido. Los archivos de entrada adicionales permiten la especificación de fuentes direccionales, así como propiedades geoacústicas para los medios delimitadores. También se pueden proporcionar los coeficientes de reflexión superior e inferior (Porter, 2011). [13]

BELLHOP3D es una extensión de los entornos 3D del modelo anterior e incluye (opcionalmente) refracción horizontal en el plano latitud-longitud. Por supuesto, los campos de presión 3D se pueden calcular mediante un modelo 2D simplemente ejecutándolo en una serie de radiales (líneas de rodamiento) desde la fuente. Este es el llamado enfoque Nx2D o 2.5D. Sin embargo, ese enfoque descuida la refracción de la energía sonora fuera del plano vertical asociado con cada línea de rodamiento (Porter, 2016). [14]

Para aplicar este algoritmo hemos utilizado dos ficheros: `.env` y `.bty`

- El **fichero de entrada** (también llamado fichero de entorno) es un simple fichero de texto creado utilizando cualquier editor de texto estándar y debe tener una extensión

.env. En la *Tabla 2* encontraremos la estructura del fichero línea a línea y la funcionalidad de cada una de ellas.

Nº lin.	Código	Comentario / descripción
1	'PUERTO DE GANDIA'	! TITULO
2	63.0	! FREQ(Hz)
3	1	! NMEDIA (1 siembre para Bellhop)
4	'CVM'	! SSPOPT (Analytic or C-linear interpolation)
Opciones: - C: interpolar velocidad de sonido de forma lineal a trozos; S: ajuste spline, el perfil varía suavemente. - V: opción estándar de vacío para la superficie del océano - W: indica que la atenuación se especifica en dB/m; M: en dB/longitud de onda; F: dB/mkHz		
5	0 0.0 11.5	! DEPTH of bottom (m) (profundidad) indica la última línea que hay que leer en el perfil de velocidad de sonido NMESH: número de puntos de malla utilizados en la discretización interna. Si escribe 0 para el número de puntos de malla, el código calcular NMESH automáticamente. BELLHOP ignora este parámetro, ya que no es relevante para su técnica numérica. SIGMA: rugosidad RMS en la interfaz (ignorada por BELLHOP y SPARC) Z: Profundidad (m)
6	0.0 1514.0 /	! perfil de velocidad de sonido profundidad (m) - velocidad (m/s)
7	11.5 1514.0 /	! perfil de velocidad de sonido profundidad (m) - velocidad (m/s)
8	'A~' 0.0	! limite inferior (A: fondo debe modelarse como un semiespacio acústico-elástico) (~ hay una batimetría asociada) La opción 'A' se utiliza generalmente para el fondo oceánico modelado.
Tipo de condición de contorno inferior. - VACÍO 'V' debajo fondo. - Semiespacio acústico-elástico 'A'. Requiere otra línea con el semiespacio como se describe en el bloque. - 'R' perfectamente RÍGIDA. - Tamaño de grano 'G' Reflexión - 'F' coeficiente de un ARCHIVO		
9	11.5 1600 0.0 1.8 0.0158 /	! limite inferior Esta línea solo debe incluirse si la línea 8 es 'A' Syntax: ZB CPB CSB RHOB APB ASB Descripción:

		- ZB: Profundidad m). CPB: Velocidad de la onda P inferior (m/s). - CSB: Velocidad de la onda S inferior (m/s). - RHOB: Densidad del fondo (g/cm ³). - APB: Atenuación de la onda P inferior. (unidades de la línea 4) - ASB: Atenuación de la onda S inferior. (unidades de la línea 4)
10	1	! número de cordenadas en x
11	0.389298	! posición de la coordenada x (en km)
12	1	! número de cordenadas en y
13	0.478560	! posición de la coordenada y (en km)
14	1	! NSD Numero de fuentes
15	3.0 /	! SD(1:NSD) (m) Posicion de la fuente
16	3	! NRD Numero de receptores
17	3 5 10 /	! RD(1:NRD) (m) rango donde se distribuirán los receptores
18	1500	! NR numero de rayos
19	-0.0 2 /	! R(1:NR) (km) rango de la simulación en X e Y
20	1500	! Ntheta (number of bearings)(número de haces)
21	-180 180 /	! bearing angles (degrees)
22	'IG 3'	! 'R/C/I/S' (I: TL incoherentes; G: rayo gausiano)

Opciones:

R: raytrace

E: rayos conectan Fuente y receptor

C: TL coherente

S: TL semi-coherentes

I: TL incoherente

G: Rayo Gaussiano

23	1500	! Nalpha
24	-45 45/	! alpha1, 2 (degrees) Elevation/declination angle fan Asumiendo negativo
25	1500	! Nbeta
26	-180 180/	! beta1, beta2 (degrees) bearing angle fan
27	1. 3 3 15.0	! STEP (m), Box%x Box%y Box%z (m) (RANGOS: paso(m), algo mas de ancho, algo más de largo y algo más de profundidad)

para asegurar la compatibilidad con los otros modelos de Acoustics Toolbox, acabaremos las líneas con '/'. Los otros modelos, por ejemplo, esperan atenuaciones, velocidades de corte y una densidad como parámetros adicionales y el '/' les dice que dejen de leer la línea y utilicen los valores por defecto.

Tabla 2: Fichero '.env' - BELLHOP

- La **batimetría** se define en un archivo separado con extensión **'.bty'**. La primera línea especifica 'L' para un ajuste lineal a trozos, 'C' para un ajuste curvilíneo o, como en nuestro caso, 'R' para especificar que el fondo marino tiene un perfil regular o uniforme. Tenemos que imaginar que trabajamos con una matriz con ejes cartesianos con el punto (0,0) arriba a la izquierda. La línea dos es el número de puntos que tiene el *eje x*. La línea tres son los valores de dichos puntos del *eje x*. La línea cuatro es el número de puntos que tiene el *eje y*. La línea cinco son los valores de dichos puntos del *eje y*. El resto de las líneas son los valores que tiene la tabla siguiendo el orden de izquierda a derecha y de arriba a abajo. En la *imagen 5* podemos ver el comienzo de este archivo

322	4.992	9.983	14.975	19.967	24.958	29.95	34.942	39.934	44.925	49.917	54.908	59.9	64.892	69.883	74.875	79.867	84.858	89.85	94.842	99.833	104.825	109.817	114.808	119.8	124.792	129.783	134.775	139.767	
	134.749	139.739	144.730	149.721	154.712	159.703	164.694	169.685	174.676	179.667	184.658	189.649	194.640	199.631	204.622	209.613	214.604	219.595	224.586	229.577	234.568	239.559	244.550	249.541	254.532	259.523	264.514	269.505	
	284.525	289.517	294.508	299.5	304.492	309.483	314.475	319.467	324.458	329.45	334.442	339.433	344.425	349.417	354.408	359.4	364.392	369.383	374.375	379.367	384.358	389.35	394.342	399.333	404.325	409.317	414.308	419.3	
	424.292	429.283	434.275	439.267	444.258	449.25	454.242	459.233	464.225	469.217	474.208	479.2	484.192	489.183	494.175	499.167	504.158	509.15	514.142	519.133	524.125	529.117	534.108	539.1	544.092	549.083	554.075	559.067	
	564.058	569.05	574.042	579.033	584.025	589.017	594.008	599	603.992	608.983	613.975	618.967	623.958	628.95	633.942	638.933	643.925	648.917	653.908	658.9	663.892	668.883	673.875	678.867	683.858	688.85	693.842	698.833	
	703.825	708.817	713.808	718.8	723.792	728.783	733.775	738.767	743.758	748.75	753.742	758.733	763.725	768.717	773.708	778.7	783.692	788.683	793.675	798.667	803.658	808.65	813.642	818.633	823.625	828.617	833.608	838.6	
	843.592	848.583	853.575	858.567	863.558	868.55	873.542	878.533	883.525	888.517	893.508	898.5	903.492	908.483	913.475	918.467	923.458	928.45	933.442	938.433	943.425	948.417	953.408	958.4	963.392	968.383	973.375	978.367	
	983.358	988.35	993.342	998.333	1003.325	1008.317	1013.308	1018.3	1023.292	1028.283	1033.275	1038.267	1043.258	1048.25	1053.242	1058.233	1063.225	1068.217	1073.208	1078.2	1083.192	1088.183	1093.175	1098.167	1103.158	1108.15	1113.142	1118.133	1123.125
	1068.217	1073.208	1078.2	1083.192	1088.183	1093.175	1098.167	1103.158	1108.15	1113.142	1118.133	1123.125	1128.117	1133.108	1138.1	1143.091	1148.083	1153.075	1158.066	1163.058	1168.05	1173.041	1178.033	1183.025	1188.016	1193.008	1198	1202.991	1207.982
	1148.083	1153.075	1158.066	1163.058	1168.05	1173.041	1178.033	1183.025	1188.016	1193.008	1198	1202.991	1207.982	1212.973	1217.966	1222.958	1227.95	1232.941	1237.932	1242.923	1247.914	1252.905	1257.896	1262.887	1267.878	1272.869	1277.86	1282.851	1287.842
	1222.958	1227.95	1232.941	1237.932	1242.923	1247.914	1252.905	1257.896	1262.887	1267.878	1272.869	1277.86	1282.851	1287.842	1292.833	1297.824	1302.815	1307.806	1312.797	1317.788	1322.779	1327.77	1332.761	1337.752	1342.743	1347.734	1352.725	1357.716	1362.707
	1362.707	1367.698	1372.689	1377.68	1382.68	1387.671	1392.662	1397.653	1402.644	1407.635	1412.626	1417.617	1422.608	1427.599	1432.59	1437.581	1442.572	1447.563	1452.554	1457.545	1462.536	1467.527	1472.518	1477.509	1482.5	1487.491	1492.482	1497.473	1502.464
	1377.7	1382.691	1387.683	1392.675	1397.666	1402.658	1407.649	1412.641	1417.632	1422.623	1427.614	1432.605	1437.596	1442.587	1447.578	1452.569	1457.56	1462.551	1467.542	1472.533	1477.524	1482.515	1487.506	1492.497	1497.488	1502.479	1507.47	1512.461	1517.452
	1457.566	1462.558	1467.549	1472.541	1477.532	1482.523	1487.514	1492.505	1497.496	1502.487	1507.478	1512.469	1517.46	1522.451	1527.442	1532.433	1537.424	1542.415	1547.406	1552.397	1557.388	1562.379	1567.37	1572.361	1577.352	1582.343	1587.334	1592.325	1597.316
	1547.333	1552.324	1557.315	1562.306	1567.297	1572.288	1577.279	1582.27	1587.261	1592.252	1597.243	1602.234	1607.225	1612.216	1617.207	1622.198	1627.189	1632.18	1637.171	1642.162	1647.153	1652.144	1657.135	1662.126	1667.117	1672.108	1677.099	1682.09	1687.081
321	4.985	9.96000001	14.954	19.938	24.923	29.907	34.891	39.876	44.86	49.845	54.829	59.814	64.798	69.782	74.767	79.751	84.736	89.72	94.705	99.689	104.673	109.658	114.642	119.627	124.611	129.596	134.58	139.564	
	139.544	144.529	149.514	154.498	159.482	164.467	169.451	174.435	179.419	184.403	189.388	194.372	199.356	204.34	209.324	214.31	219.294	224.278	229.261	234.245	239.229	244.213	249.197	254.181	259.164	264.148	269.132	274.116	279.1
	279.128	284.113	289.097	294.082	299.066	304.051	309.035	314.019	319.004	324.988	329.973	334.957	339.942	344.926	349.911	354.895	359.879	364.864	369.848	374.833	379.817	383.801	388.786	393.77	398.755	403.739	408.724	413.708	418.692
	418.692	423.677	428.661	433.646	438.63	443.615	448.598	453.581	458.564	463.548	468.531	473.514	478.496	483.479	488.462	493.445	498.428	503.411	508.394	513.377	518.361	523.346	528.33	533.314	538.297	543.28	548.263	553.247	558.23
	558.235	563.219	568.202	573.185	578.168	583.151	588.134	593.117	598.1	603.083	608.066	613.049	618.032	623.015	628.0	633.0	638.0	643.0	648.0	653.0	658.0	663.0	668.0	673.0	678.0	683.0	688.0	693.0	698.0
320	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Imagen 5: Fichero ‘.bty’ – BELLHOP

Este fichero, da como resultado la *Imagen 6* correspondiente a la batimetría del Puerto de Gandía:

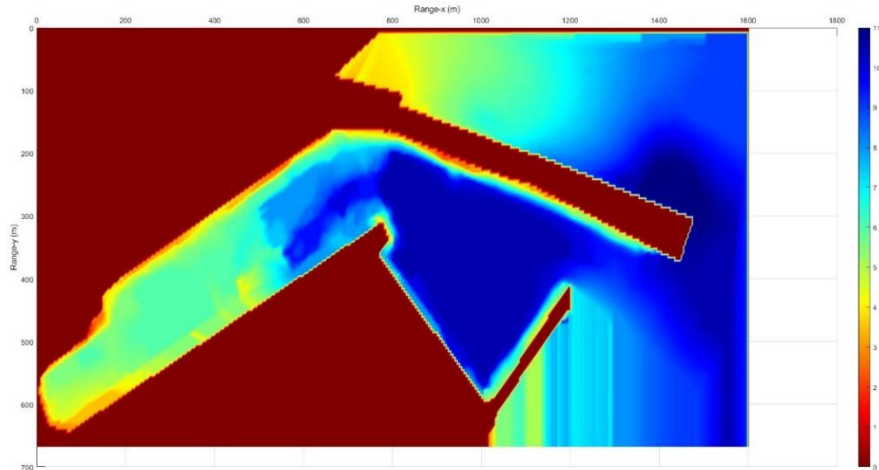


Imagen 6: Batimetría Puerto de Gandía.

En nuestro caso, haremos las simulaciones para las frecuencias de 125 Hz y 63 Hz y estas, a su vez, se realizarán para pérdidas por transmisión (TL) coherentes, semicoherentes e incoherentes. La diferencia entre estas es que la coherente tiene en cuenta todas las fases de las trayectorias, es decir, que se consideran los choques de las ondas tanto con la superficie como con el fondo; la semicoherente solo considera el fondo y la incoherente no considera ninguno de los dos.

5. Legislación y normativas

La legislación española relacionada con el ruido subacuático está formada por las siguientes normas:

- Ley 22/1988 de Costas.
- Ley 37/2003 del Ruido.
- Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y la Biodiversidad.
- Orden AAA/75/2012.
- Ley 41/2010 de Protección del Medio Marino.
- Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental.
- Ley 27/1992 de Puertos del Estado y de la Marina Mercante.

Normativas ISO relacionadas con el ruido subacuático:

- ISO 17208-1:2016. 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.
- ISO 17208-2:2019. Underwater acoustics. Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships. Part 2: Determination of source levels from deep water measurements.
- ISO/DIS 17208-3. Underwater acoustics. Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships. Part 3: Requirements for measurements in shallow water.

Por el momento, no existe en nuestro país ninguna norma legal que establezca umbrales de ruido subacuático. Algunos países que sí que tienen los umbrales definidos son Estados Unidos, Reino Unido o Nueva Zelanda.

Los documentos legales, muy en general hablan sobre:

- Ley 22/1988 de Costas: regula la protección y utilización del dominio público marítimo-terrestre.
- Ley 37/2003 del Ruido: regula la contaminación acústica y proteger el medio ambiente contra el ruido, pero se centra en el ruido aéreo.
- Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y la Biodiversidad: enfocada en la protección del patrimonio natural y la biodiversidad y el impacto ambiental.
- Orden AAA/75/2012: establece los criterios para la evaluación de impacto ambiental en el medio marino.
- Ley 41/2010 de Protección del Medio Marino: habla sobre la protección del medio marino. Solo hace referencias a ruidos acuáticos en general.
- Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental: Esta ley regula los procedimientos de evaluación ambiental. Es posible que, en el contexto de evaluaciones de impacto ambiental, se trate el tema del ruido subacuático, pero no de manera específica para el dragado o los puertos.
- Ley 27/1992 de Puertos del Estado y de la Marina Mercante: Regula la gestión de los puertos y la marina mercante, pero no aborda específicamente el tema del ruido subacuático.
- ISO 17208-1:2016: Esta norma trata sobre las cantidades y procedimientos para la descripción y medición del sonido subacuático de los barcos en aguas profundas, enfocándose en mediciones de precisión.
- ISO 17208-2:2019: Similar a la anterior, esta norma se centra en la determinación de niveles de origen del sonido subacuático de barcos en aguas profundas.
- ISO/DIS 17208-3: Esta norma, en su versión de borrador, aborda los requisitos para mediciones en aguas poco profundas.

En resumen, ninguno de los documentos menciona nada sobre ruido de dragados (o similares) o los niveles acústicos submarinos. Solo la Ley 41/2010 de Protección del Medio Marino habla sobre el impacto del ruido subacuático antropogénico en la vida marina y la Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental menciona que es necesario hacer evaluaciones de impacto ambiental en algunos proyectos específicos. Las ISO hablan sobre la medición del ruido subacuático generado por barcos tanto en aguas profundas como en las someras.

6. Desarrollo y resultados del trabajo

6.1. Medidas en el Puerto de Gandía⁶

El **equipamiento técnico** utilizado ha sido el siguiente:

Sistema de emisión (*Imagen 8*)

- Proyector de bajas frecuencias (*Imagen 7*): Lubell VC2C Underwater Acoustic Transducer (más información del dispositivo en [\[Enlace 1\]](#)⁷).



Imagen 7: Lubell VC2C Underwater Acoustic Transducer

Amplificador de potencia: PLE-1PXX0-EU POWER AMPLIFIER (más información del dispositivo en [\[Enlace 2\]](#)).

Osciloscopio: R&S®RTM3000 (más información del dispositivo en [\[Enlace 3\]](#)).



Imagen 8: Montaje del emisor

Sistema de recepción

- Sistema 1 (Urec384K) (*Imagen 9*)

Dispositivo de monitorización acústica autónomo Urec384K (más información del dispositivo en [\[Enlace 4\]](#)).

⁶ Nota 1: todos los archivos de las medidas y el postproceso de la señal se pueden encontrar en la carpeta Ficheros Anexos>Medidas Puerto Gandía.

⁷ Nota 2: si no se pueden consultar los enlaces, están escritos en la bibliografía.

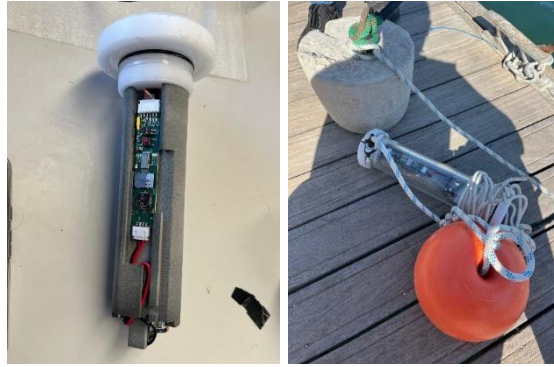


Imagen 9: Urec384K

- Sistema 2 (Hidrófono: Brüel & Kjaer) (Imagen 10;11;12)
 - Hidrófono en miniatura Brüel & Kjaer modelo 8103 (más información del dispositivo en [\[Enlace 5\]](#)).
 - Amplificador de señal: Brüel & Kjaer Nexus 2690-OS conditioning amplifier- 2 channel (más información del dispositivo en [\[Enlace 6\]](#)).
 - Osciloscopio: R&S®RTM3000 (más información del dispositivo en [\[Enlace 7\]](#)).

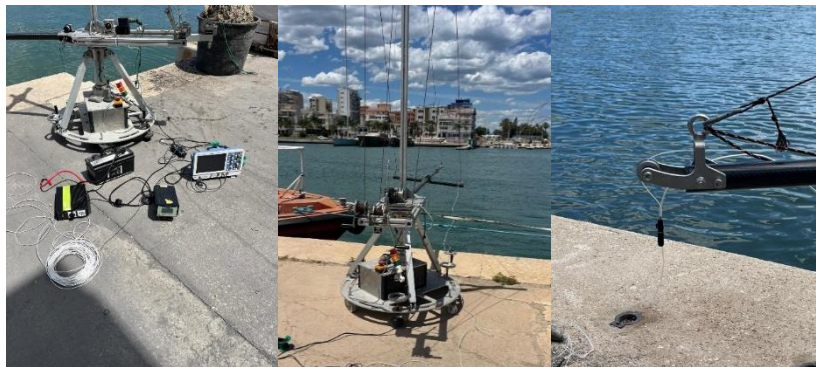


Imagen 10: Osciloscopio, amplificador y fuente;

Imagen 11: Grúa para sumergir el hidrófono;

Imagen 12: Hidrófono Brüel & Kjaer

- Sistema 3 (Samaruc) (Imagen 13)
 - Dispositivo de monitorización acústica pasiva Samaruc (más información del dispositivo en [\[Enlace 8\]](#)).



Imagen 13: Samaruc

6.1.1. Medida 1 (16/06/24)

Descripción de la medida 1

El día 19 de junio de 2024, se realizan distintos fondeos en el puerto de Gandía. Para ello, se han colocado el emisor y los receptores como podemos ver en el esquema de la *Imagen 14*.

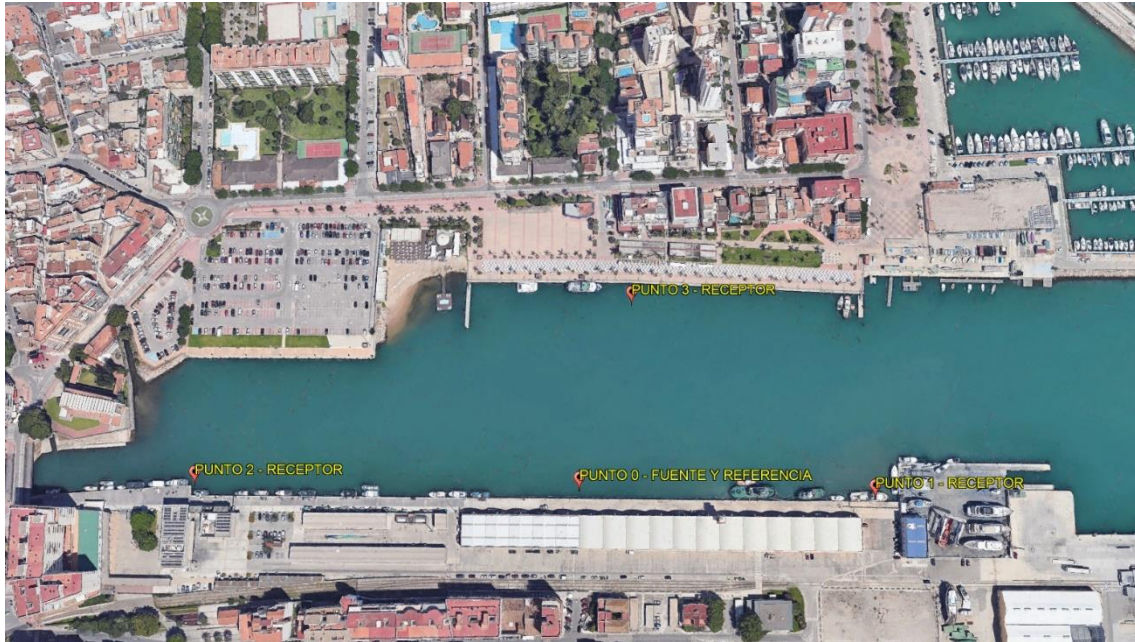


Imagen 14: Puntos de referencia, emisión y recepción

En el PUNTO 1 se encontraba el *Sistema 1 (Urec384K)*.

En el PUNTO 2 y como REFERENCIA se montó el *Sistema 2 (Hidrófono Brüel & Kjaer)*.

En el PUNTO 3 se colocó el *Sistema 3 (Samaruc)*.

En el punto FUENTE se montó el *Sistema de emisión*.

Medida 1 de referencia:

El emisor se sitúa enfrente del tinglado 5. El montaje utilizado fue el que se puede ver en la *Imagen 15*. Las frecuencias de emisión utilizadas fueron 63 Hz y 125 Hz. La profundidad a la que se sumergió la fuente fue a 2.5 metros.

Se configuraron los siguientes parámetros para la recepción:

- Frecuencia de muestreo : 23700Samples/s
- Sensibilidad del hidrófono: 3.16 mV/Pa

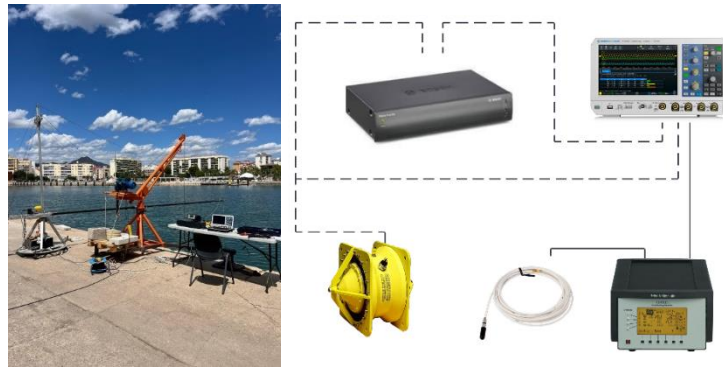


Imagen 15: Montaje para la medida de referencia

Medida 1 en el Punto 1.

El Punto 1 (*Imagen 16*) se sumerge el equipo de fondeo del Sistema 1 (Urec384K).



Imagen 16: Punto 1, Pantalán UPV

El equipo se ha configurado de la siguiente forma:

- Archivos de 1 hora de duración.
- Frecuencia de muestreo de 192000Samples/s.
- Sensibilidad: $-180\text{ dB re } 1\text{ }\mu\text{Pa @1 m}$.
- Tiempo de grabación 3 días.

Medida 1 en el Punto 2.

En el Punto 2 (*Imagen 17*) se monta el Sistema 2 (Hidrófono Brüel & Kjaer).



Imagen 17: Punto 2, Llotja de Gandía

Medida 1 en el Punto 3.

En el Punto 3 (*Imagen 18*) se coloca el Sistema 3 (Samaruc).

Realiza medidas de archivos de audio de 15 minutos y descansa durante un minuto. Graba en total 16 archivos.

La frecuencia de muestreo es de 192000 Samples/s y la sensibilidad -163 dB re $1 \mu\text{Pa}$ @1 m.



Imagen 18: Punto 3, enfrente Tinglado 5

La característica de este punto de medición es que se encuentra prácticamente enfrente con el emisor.

6.1.2. Medida 2 (03/07/24)

Descripción de la medida 2

El día 3 de julio de 2024 se realizan de nuevo los fondeos en el puerto de Gandía. Para ello, se han colocado el emisor y los receptores como podemos ver en el esquema de la Imagen 19.



Imagen 19: Posicionamiento puntos de medida final

Se ha mantenido la posición de la FUENTE.

Se ha repetido la medida en el PUNTO 1, colocando de nuevo el Sistema 1 (Urec384K).

La medida en el PUNTO 2 no se ha podido repetir debido a los barcos que había amarrados en esa zona, por ello se ha añadido un nuevo punto (PUNTO 4) en la zona de enfrente y se ha medido con el Sistema 1 (Urec384K).

El PUNTO 3 como la medida fue válida la primera vez, no se ha repetido.

Medida 2 en el PUNTO 1.

El PUNTO 1 se sumerge el mismo equipo de fondeo (Sistema 1 (Urec384K)).

El equipo se ha configurado de la siguiente forma:

- Archivos de 15 minutos de duración.
- Frecuencia de muestreo de 192000Samples/s.
- Tiempo de grabación 15 minutos.
- Sensibilidad: -180 dB re $1\text{ }\mu\text{Pa}$ @1 m.

Medida 2 en el PUNTO 4.

El PUNTO 4 (*Imagen 20*) se sumerge el mismo equipo de fondeo que en el PUNTO 1 (Sistema 1 (Urec384K)).

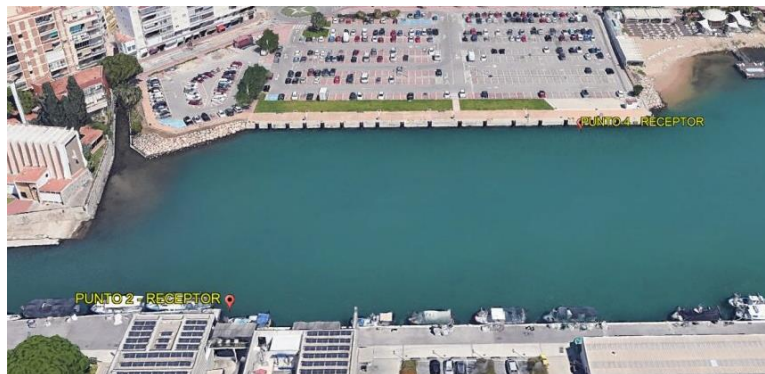


Imagen 20: Punto 4, Parquin puerto.

El equipo se ha configurado de la siguiente forma:

- Archivos de 5 minutos de duración.
- Frecuencia de muestreo de 192000Samples/s.
- Tiempo de grabación 40 minutos.
- Sensibilidad: -163 dB re $1\text{ }\mu\text{Pa}$ @1 m.

6.2. Resultados de las medidas

- RESULTADO MEDIDA 1, REFERENCIA

Para corroborar los niveles de emisión se realiza una medida de referencia a través del Sistema 2.

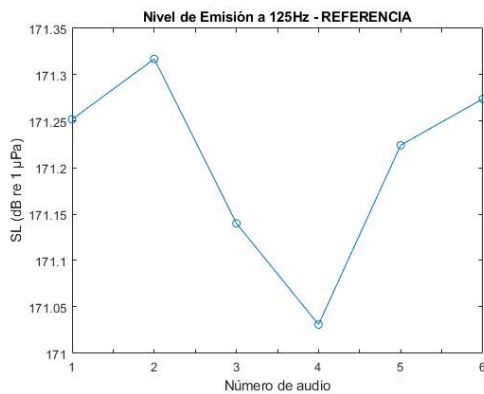
Los archivos registrados necesitan un tratamiento digital. Este se ha hecho a través del Script de Matlab que está en la carpeta "Ficheros Anexos">"Medidas Puerto Gandia">"Medida1_Referencia(19.06.24)" >"ReferenciaM1.m". En estos archivos, las líneas de código van comentadas para explicar el proceso, pero en general se ha hecho: en primer lugar, se han definido los parámetros de frecuencia de muestreo y sensibilidad. Seguidamente, se han cargado los ficheros y se hecho un vector que va desde la frecuencia de muestreo hasta una longitud que viene determinada por el tamaño de ventana de la señal. Esta se define según el tramo donde existe señal (hay que ajustarlo correctamente y ver que no cortamos la señal). Se hace la trasformada de Fourier y se centra en 0 para poder convertirlo a frecuencia. El resultado se pasa a voltaje (dBV) y, por último, se pasa a nivel de presión (dB) aplicandole la sensibilidad de la señal.

Finalmente, para obtener el resultado, buscamos los máximos de presión de estos archivos entre los márgenes de frecuencia que desamos. Por ejemplo, para el tono de 125Hz filtramos la señal entre 100 y 150 Hz. De esta manera, obtenemos el nivel de presión recibido el hidrófono de referencia, es decir, así obtenemos el nivel de emisión real (SL). El último paso consiste en representar las gráficas.

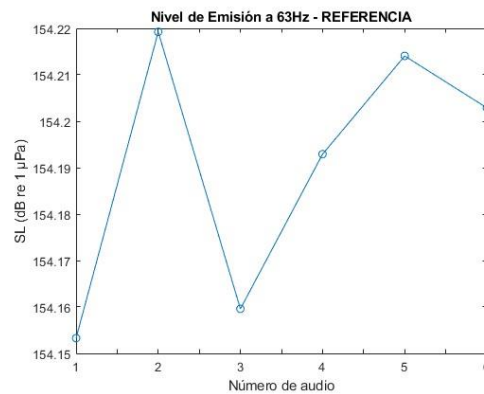
Cabe destacar que el proceso se ha hecho con seis muestras de audio y finalmente se han promediado para obtener un valor.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Promedio del nivel de emisión (SL) a 125Hz $171.2 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa} @ 1 \text{ m} \pm 0.1$
Promedio del nivel de emisión (SL) a 63 Hz $154.19 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa} @ 1 \text{ m} \pm 0.03$



Gráfica 1: Medida 1 - Nivel de emisión a 125Hz



Gráfica 2: Medida 1 - Nivel de emisión a 63Hz

- RESULTADO MEDIDA 1, PUNTO 1

Por errores con el dispositivo no se ha guardado ningún dato. El sistema es muy sensible a movimientos y golpes. Creemos que por un movimiento en las pilas se ha desconectado y desconfigurado, ya que en la tarjeta de memoria había un archivo, pero vacío. No fuimos capaces de recuperar ningún dato. Se opta por repetir la medida.

- RESULTADO MEDIDA 1, PUNTO 2

En este punto no conseguíamos una recepción adecuada. Esto puede ser debido al pequeño tamaño del puerto. Cuanto menor es el puerto, las longitudes de onda que se pueden transmitir son más pequeñas. Por ello, se transmitirán peor las frecuencias bajas que las altas. Por otro lado, también ha intervenido la cantidad de barcos que había amarrados entre el emisor y el receptor, haciendo, así, que no se puedan transmitir de punto a punto el sonido.

Por otro lado, la medida se realizó con el hidrófono y se registraba la señal a través del osciloscopio. Dado el nivel de ruido de fondo que había, era imposible de detectar y aislar la señal emitida. Como solución, se opta por repetir la medida con otro sistema de medición.

Otra forma de evaluar las pérdidas a tan bajas frecuencias sin tener que medir en el puerto sería haciendo una simulación de modos normales, la cual es adecuada para este tipo de condiciones.

- RESULTADOS MEDIDA 1, PUNTO 3

El registro de estas medidas ha sido a través de archivos de audio. Para poder extraer los datos se ha tratado digitalmente la señal. El procedimiento que se ha seguido es:

Por un lado, hay que localizar los tonos deseados dentro de los archivos de audio. Para ello, hay que analizar el espectrograma de la señal. Se intentó hacer con el *software* Audacity, pero no fue posible ver los tonos. La otra opción que se tomó fue crear un *script* de Matlab (Se puede encontrar en la carpeta “Ficheros Anexos”>”Medidas Puerto Gandia”>”Medida1_Punto3_Samaruc(19.06.24)”>”samaruc.m”) para poder sacar gráficas del espectrograma de la señal en intervalos pequeños, en nuestro caso, de cinco segundos.

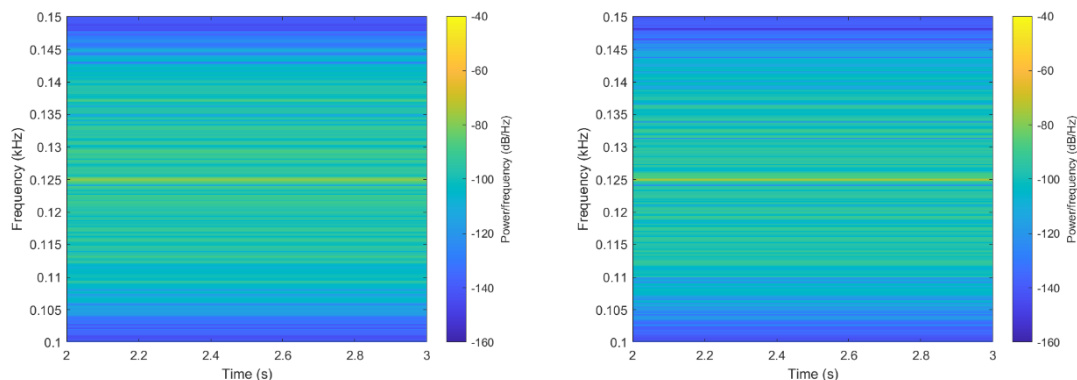
El objetivo de este *script* es leer los archivos de audio, hacer una matriz y aquí ir creando el espectrograma del tramo de señal que deseamos. Está hecho dentro de un bucle para que, de forma continua, fuera extrayendo la señal. Este bucle lee el audio, filtra con un paso banda entre los rangos de frecuencias que le damos y después con la función *spectrogram* de Matlab creamos el espectrograma. Por último, ajustamos los valores de los límites de representación, así como el del *colorbar* y guardamos las gráficas.

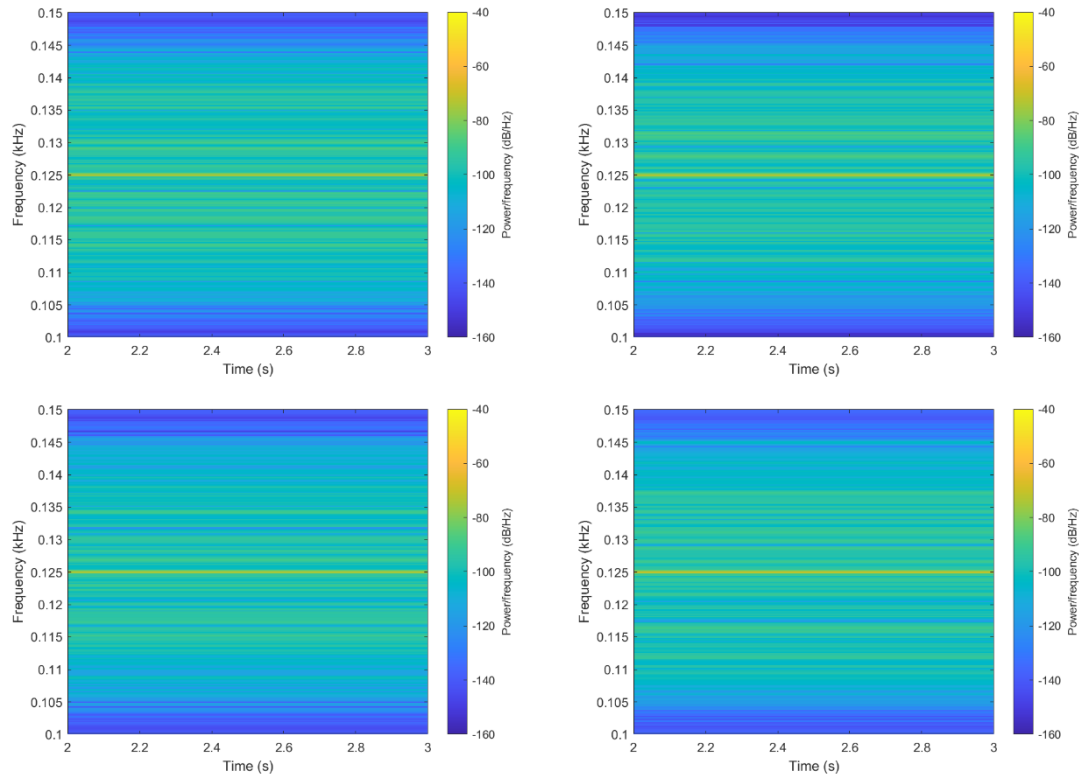
Una vez teníamos este paso, hemos hecho una inspección visual para localizar los tonos. Los seis tonos que mejor se veían son los que se ha utilizado para obtener los valores de RL y TL.

Para sacar estos valores, se ha realizado otro *script* (se puede encontrar en la carpeta “Ficheros Anexos”>”Medidas Puerto Gandia”>”Medida1_Punto3_Samaruc(19.06.24)”>”samaruc_ejecuta_63.m” o ”samaruc_ejecuta_125.m”). Es muy similar a como funciona el que se ha explicado para sacar los datos de la referencia. Ahora cargamos únicamente los datos que hemos escogido y, de la misma forma que en la referencia, se obtiene el nivel de presión de la señal. Este nivel es el que recibe el receptor (RL). Para sacar las pérdidas por transmisión (TL), le restaremos el valor de RL a la señal emitida SL.

Para todas las medidas restantes, se ha seguido este procedimiento. Cada medida tiene una carpeta organizada en los anexos con los archivos de audio y los *scripts* creados para ejecutar de forma correcta estos audios. Son los mismos *scripts*, pero adaptados a las características de la medida (frecuencia de muestreo, frecuencia a la que evaluar el tono, sensibilidad...)

El espectrograma de los tramos de audio que se han escogido para realizar el cálculo en 125 Hz son los siguientes:

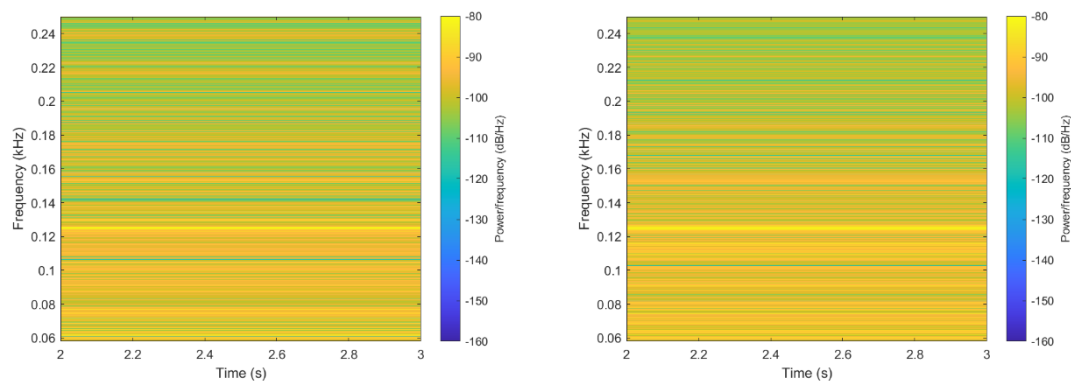


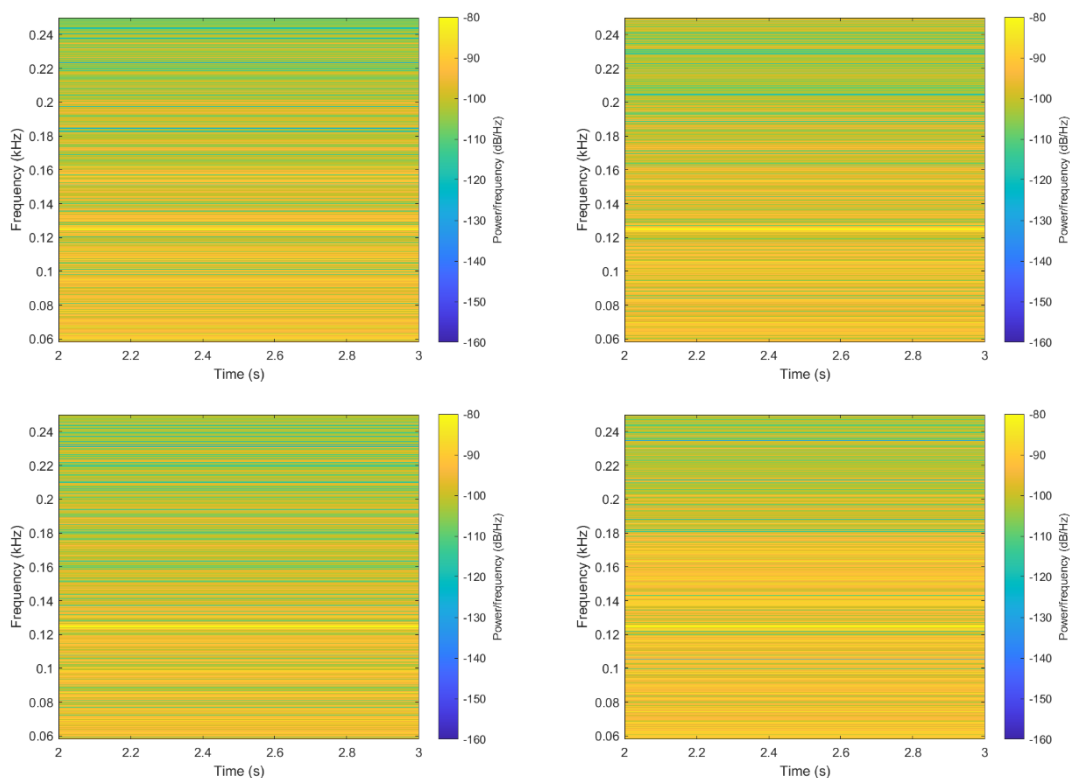


Como podemos ver, en la frecuencia de 125Hz está el tono resaltado. Se han escogido estas por la claridad en la que se veía y porque tienen menos ruido comparadas al resto.

Para la frecuencia de 63Hz no hemos conseguido ver el tono en el espectrograma, pero sí su primer armónico (126Hz). Por ello, hemos realizado el cálculo con esta frecuencia.

El principal problema es la cantidad de ruido registrado. Estos son los espectrogramas de los audios escogidos:





Por otro lado, se calcularán los valores de TL y de RL teóricos. Para el cálculo del TL teórico es necesario calcular la absorción. En este caso nos hemos aprovechado de la herramienta que proporciona el National Physical Laboratory (NPL) (<http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/seaabsorption/>) para calcularlas. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Frecuencia, f	0.125	(kHz)	Frecuencia, f	0.063	(kHz)
Temperatura, T	26.6	(Celsius)	Temperatura, T	26.6	(Celsius)
Profundidad, D	0.0025	(km)	Profundidad, D	0.0025	(km)
Salinidad, S	35	(presentación en ppt)	Salinidad, S	35	(presentación en ppt)
Acidez, pH	8		Acidez, pH	8	
		Reset			Reset

0.001	(dB km)	(Fisher y Simmons 1977)	0	(dB km)	(Fisher y Simmons 1977)
Absorción, α	0.001	(dB km)	(François y Garrison 1982)	Absorción, α	0
	0.001	(dB km)	(Ainslie y McColm 1998)		0

Imagen 21: Absorción a 125Hz

Imagen 22: Absorción a 63Hz

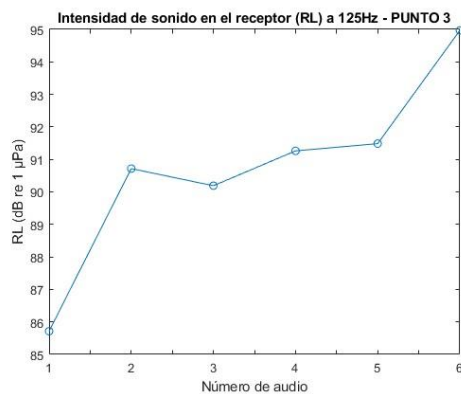
Como podemos ver, a 63Hz no existe absorción y a 125Hz como es tan baja se va a depreciar. Esto se aplica para todos los resultados de aquí en adelante.

Por lo tanto, los resultados obtenidos son los siguientes:

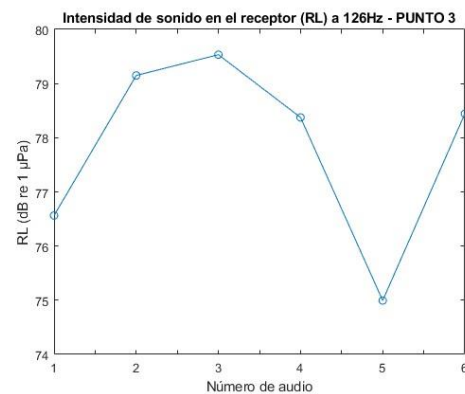
MEDIDA 1 PUNTO 3 - SAMARUC

RL _{125Hz} - Promedio recepción	91 dB re 1 μ Pa $\pm$ 3
TL _{real} 125 Hz	80 dB re 1 μ Pa $\pm$ 3
TL _{teórico_cilindrica_145m_125Hz}	21.6 dB re 1 μ Pa
TL _{teórico_cilindrica-esférica_145m_125Hz}	32.4 dB re 1 μ Pa

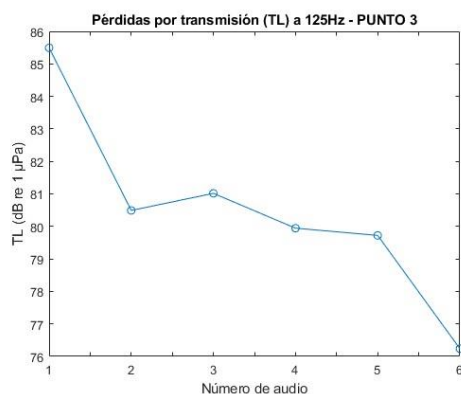
TL teórico_esféricaz_145m_125Hz	43.2 dB re 1 μ Pa
RL teórico_cilindrica_145m_125Hz	149.6 dB re 1 μ Pa $\pm$ 0.1
RL teórico_cilindrica-esférica_145m_125Hz	138.8 dB re 1 μ Pa $\pm$ 0.1
RL teórico_esférica_145m_125Hz	128.0 dB re 1 μ Pa $\pm$ 0.1
RL _{63Hz} - Promedio recepción	77 dB re 1 μ Pa $\pm$ 2
TL real 63 Hz	76 dB re 1 μ Pa $\pm$ 2
TL teórico_cilindrica_145m_63Hz	21.6 dB re 1 μ Pa
TL teórico_cilindrica-esférica_145m_63Hz	32.4 dB re 1 μ Pa
TL teórico_esférica_145m_63Hz	43.2 dB re 1 μ Pa
RL teórico_cilindrica_145m_63Hz	132.58 dB re 1 μ Pa $\pm$ 0.03
RL teórico_cilindrica-esférica_145m_63Hz	121.77 dB re 1 μ Pa $\pm$ 0.03
RL teórico_esférica_145m_63Hz	110.96 dB re 1 μ Pa $\pm$ 0.03



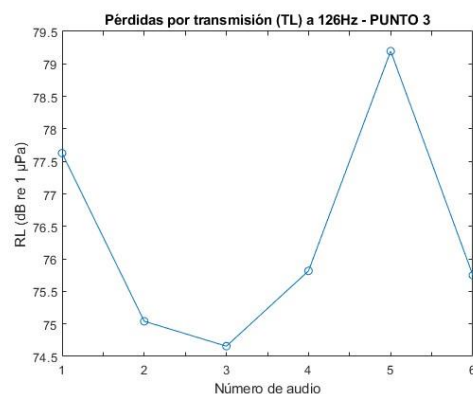
Gráfica 3: RL 125hz - PUNTO 3



Gráfica 4: RL 126 Hz- PUNTO 3



Gráfica 5: TL 125hz - PUNTO 3



Gráfica 6: RL 126 Hz- PUNTO 3

Los resultados obtenidos tienen un valor muy alto de incertidumbre. Esto es por la gran cantidad de ruido que se ha registrado en las medidas que hace que fluctúe y no sea demasiado precisa.

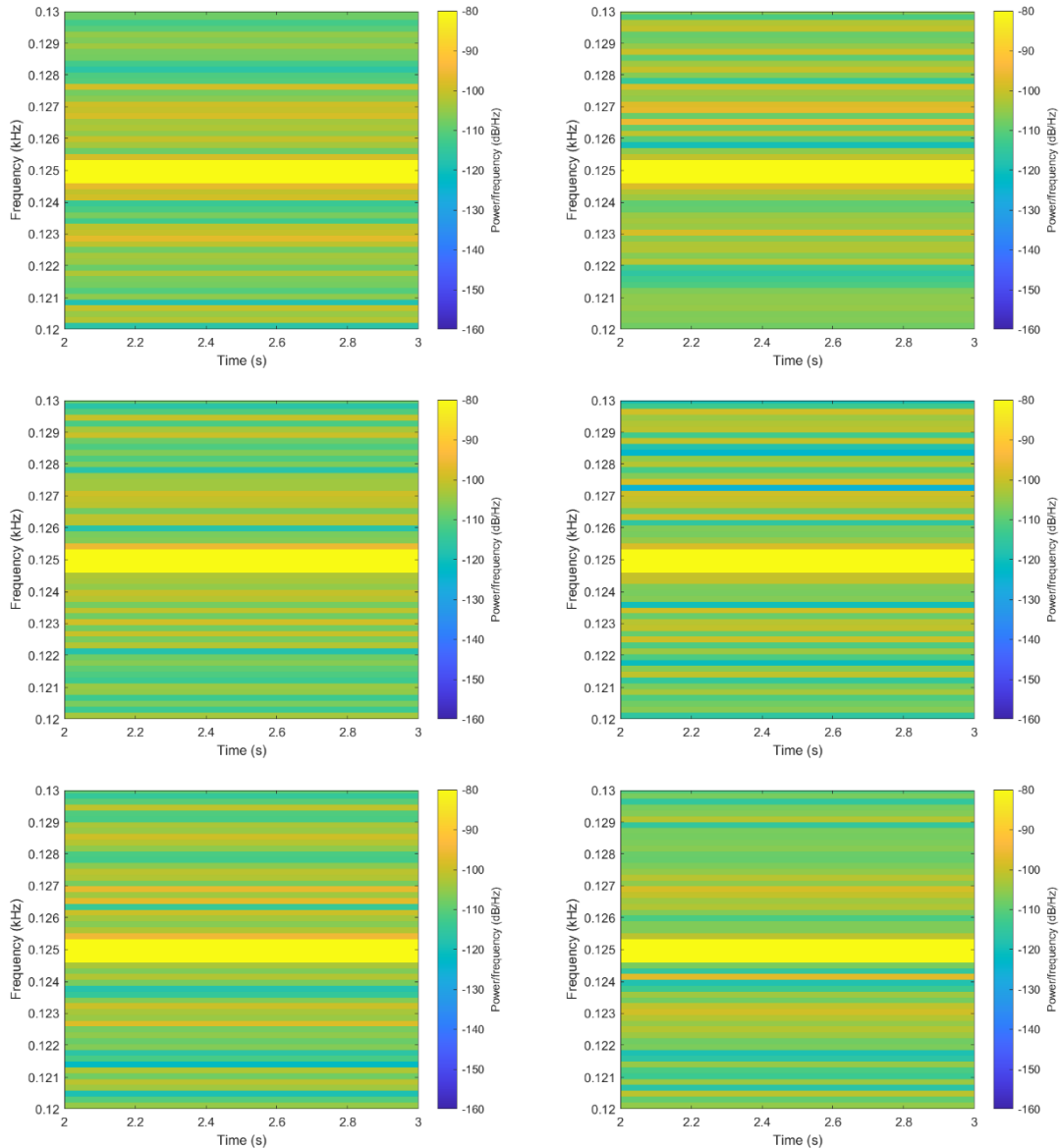
En una distancia de 154 metros (distancia entre el emisor y el receptor) existen unas pérdidas por transmisión de $TL_{real\ 125\ Hz} = 80\ dB\ re\ 1\ \mu Pa$ a 125Hz y $TL_{real\ 126\ Hz} =$

76 dB re 1 μ Pa a 126Hz. Por otro lado, los resultados teóricos de los reales difieren mucho, aun así, la propagación que mejor se adapta es la esférica.

- RESULTADO MEDIDA 2, PUNTO 1

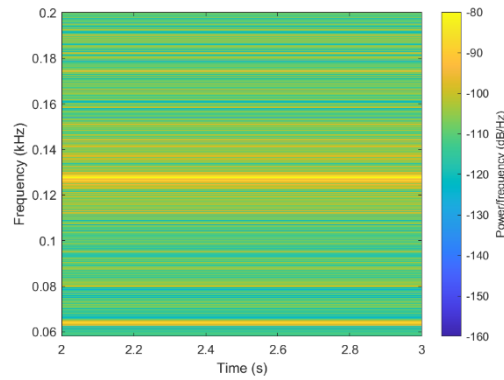
Siguiendo el mismo procedimiento que en el apartado anterior (*RESULTADOS DE MEDIDA 1, PUNTO 3*), se ha procesado el audio de esta medida.

Los tramos de espectrograma escogidos para el tono de 125Hz son los siguientes:

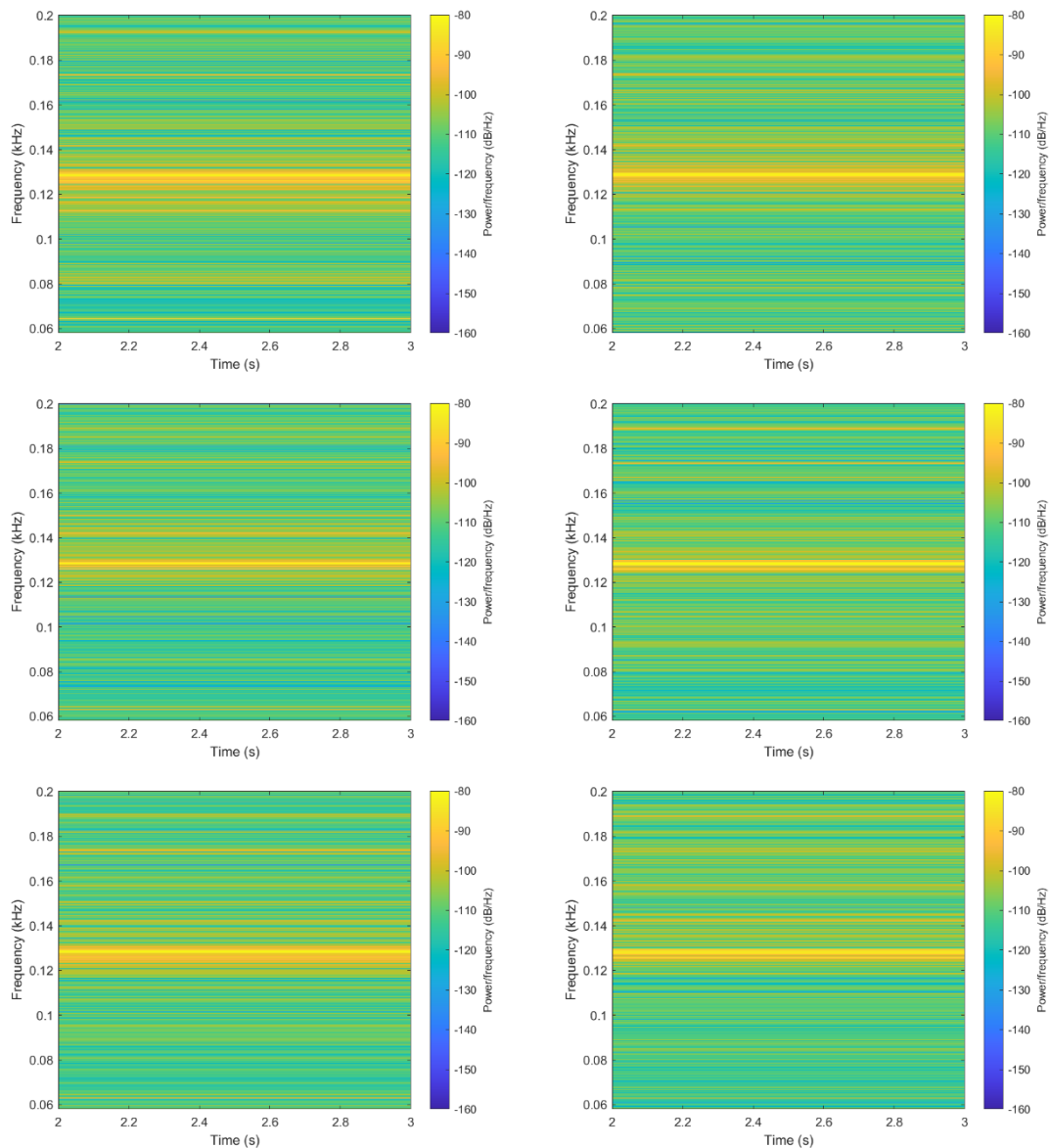


Como podemos ver, en este caso los registros tienen muchísimo menos ruido y el tono se ve mucho más claro.

Al igual que para el caso anterior (*MEDIDA 1, PUNTO 3*), para el tono de 63Hz hemos analizado tanto el tono fundamental como el primer armónico. El tono solo lo hemos podido localizar de forma clara en la siguiente imagen:



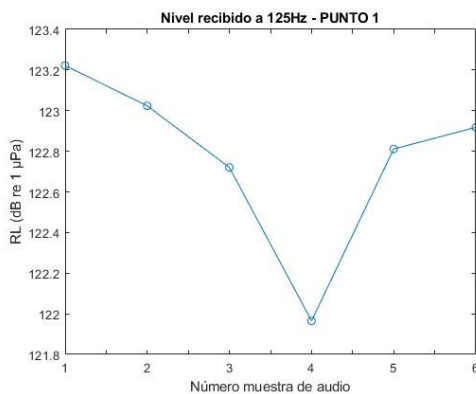
Como podemos ver, tenemos mucho más marcado el armónico (126Hz) que el tono (63Hz), pero se ven claramente los dos. Para mejorar la medida y por la falta de muestras, vamos a trabajar con el armónico una vez más. Los espectrogramas escogidos para analizar la señal son los siguientes:



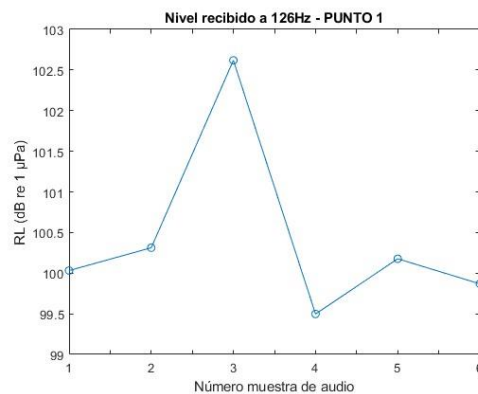
Estos son los resultados obtenidos:

MEDIDA 2 PUNTO 1 - Urec384K

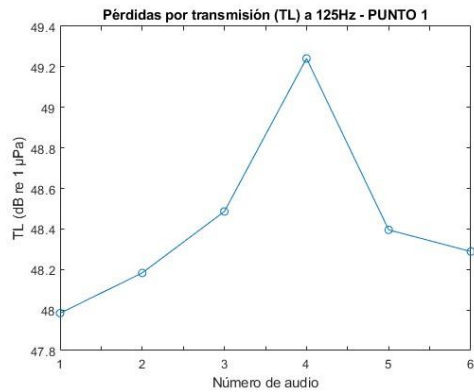
RL _{125Hz} - Promedio recepción	122.7 dB re 1 μPa ± 0.4
TL _{real 125 Hz}	48.4 dB re 1 μPa ± 0.4
TL _{teórico_cilindrica_206.5m_125Hz}	23.1 dB re 1 μPa
TL _{teórico_cilindrica-esférica_206.5m_125Hz}	32.7 dB re 1 μPa
TL _{teórico_esféricaz_206.5m_125Hz}	46.3 dB re 1 μPa
RL _{teórico_cilindrica_206.5m_125Hz}	148.1 dB re 1 μPa ± 0.1
RL _{teórico_cilindrica-esférica_206.5m_125Hz}	136.5 dB re 1 μPa ± 0.1
RL _{teórico_esférica_206.5m_125Hz}	124.9 dB re 1 μPa ± 0.1
RL _{63Hz} - Promedio recepción	100.4 dB re 1 μPa ± 1.1
TL _{real 63 Hz}	53.8 dB re 1 μPa ± 1.1
TL _{teórico_cilindrica_206.5m_63Hz}	23.14 dB re 1 μPa
TL _{teórico_cilindrica-esférica_206.5m_63Hz}	34.72 dB re 1 μPa
TL _{teórico_esférica_206.5m_63Hz}	46.30 dB re 1 μPa
RL _{teórico_cilindrica_206.5m_63Hz}	132.58 dB re 1 μPa ± 0.03
RL _{teórico_cilindrica-esférica_206.5m_63Hz}	121.77 dB re 1 μPa ± 0.03
RL _{teórico_esférica_206.5m_63Hz}	110.96 dB re 1 μPa ± 0.03



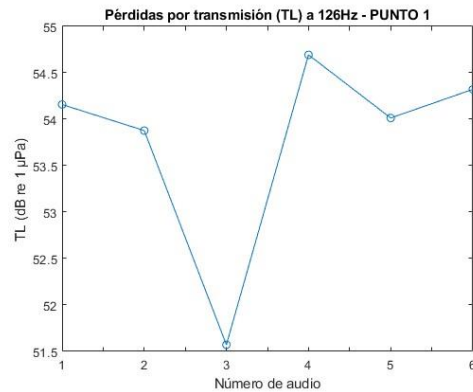
Gráfica 7: RL125Hz - PUNTO 1



Gráfica 8: RL 126 Hz - PUNTO 1



Gráfica 9: TL125hz- PUNTO 1



Gráfica 10: RL 126 Hz- PUNTO 1

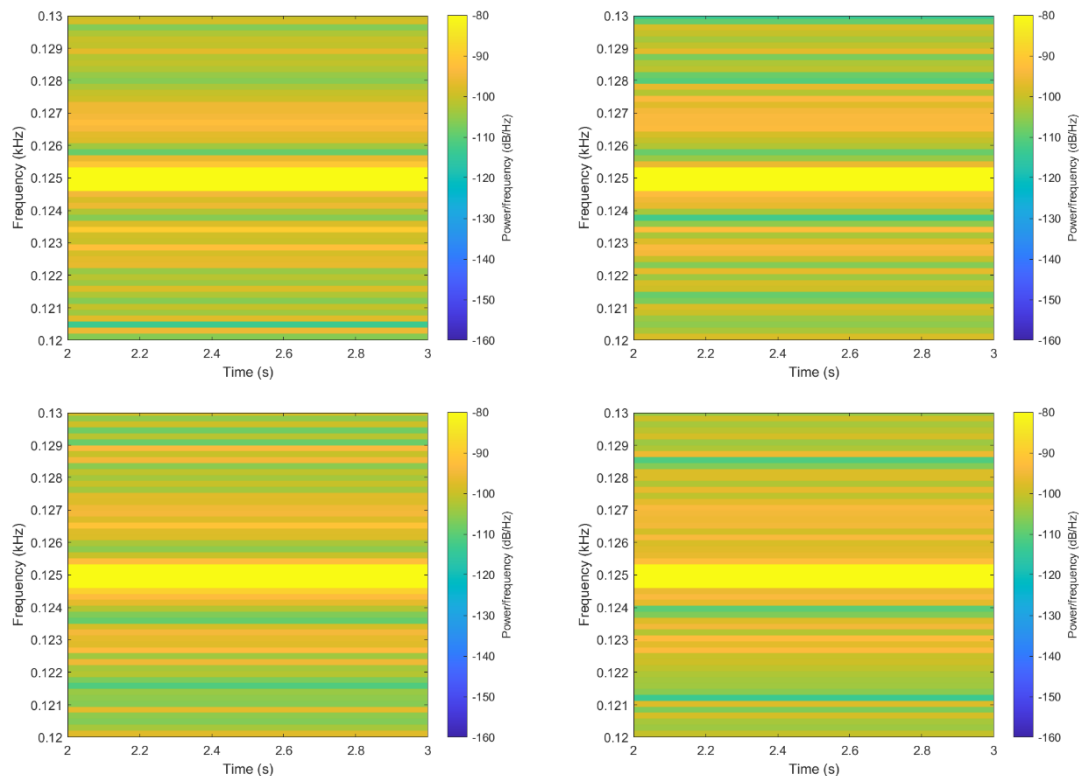
Los resultados a 125Hz son mucho mejores que los obtenidos en el Punto 3. Tienen menos incertidumbre y tienen menos pérdidas. En 63 Hz vuelve a haber alta desviación, pero es lógico debido a la baja frecuencia.

En una distancia de 206.5 metros (distancia entre el emisor y el receptor del punto 1) existen unas pérdidas por transmisión de $TL_{real\ 125\ Hz} = 48.4\ re\ 1\ \mu Pa$ a 125Hz y $TL_{real\ 126\ Hz} = 53.8\ dB\ re\ 1\ \mu Pa$ a 126Hz. En esta ocasión vuelve a ser la propagación esférica la que mejor se aproxima con los resultados teóricos a los reales.

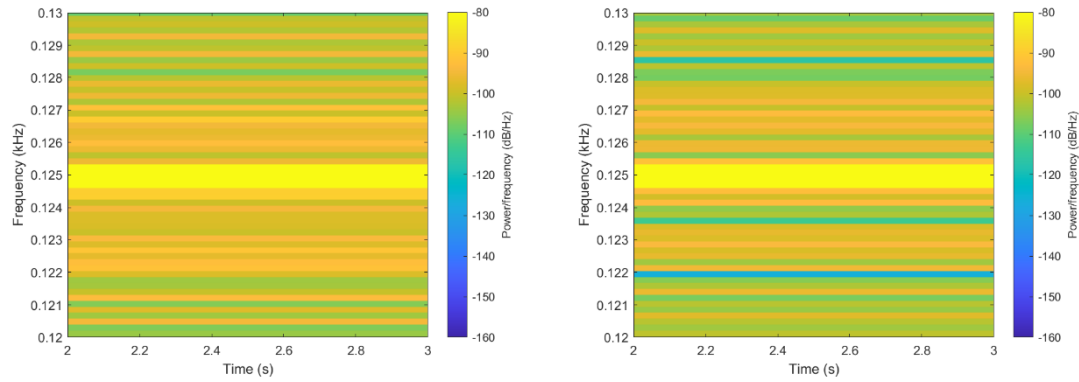
- RESULTADO MEDIDA 2, PUNTO 4

Por último, en el Punto 4 hemos medido con el Urec384K y se ha procesado todo exactamente igual que en la medida anterior.

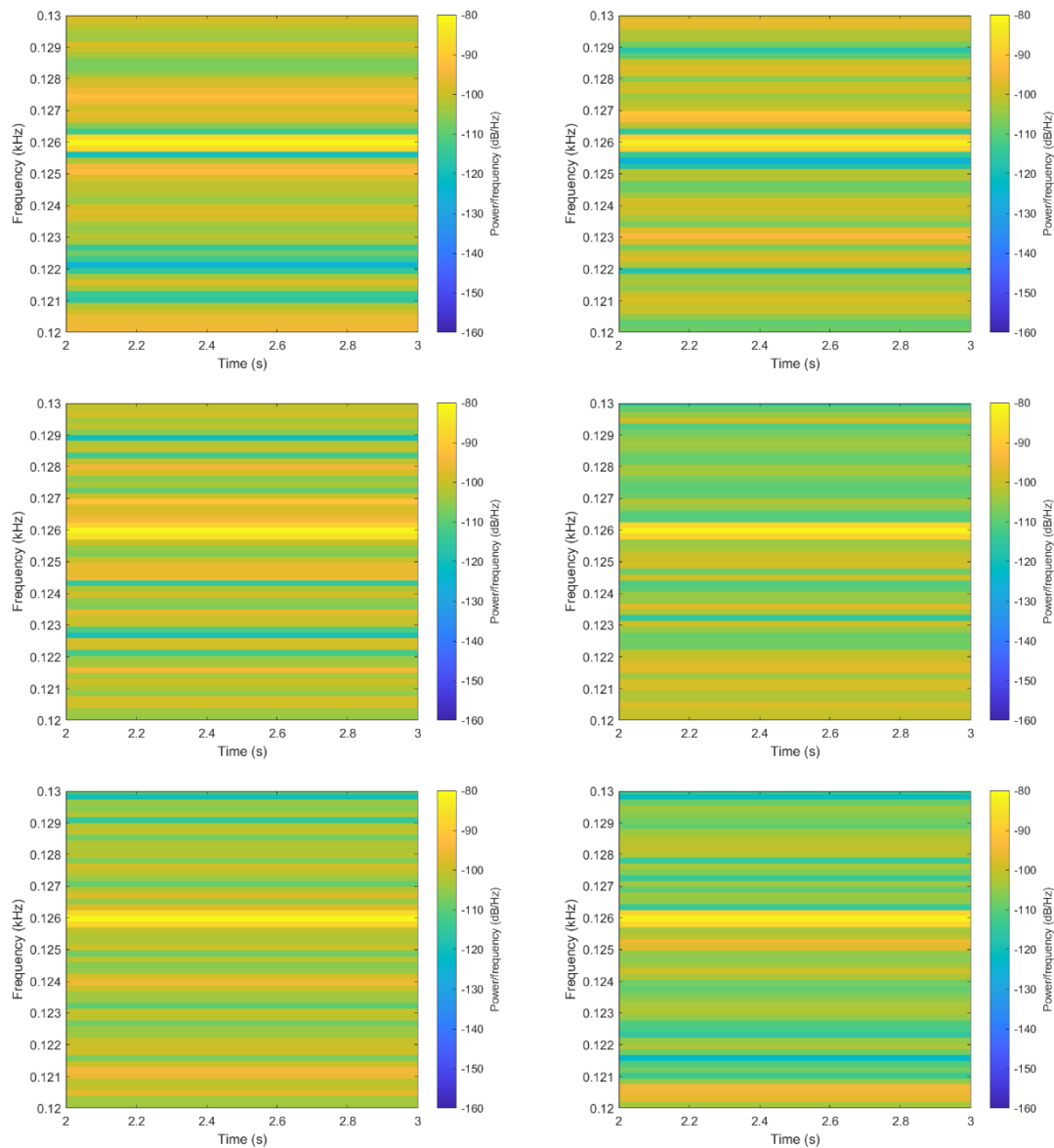
Para 125 Hz estos son los tramos de espectrograma escogidos:



TRABAJO FINAL DE GRADO
EVALUACIÓN DEL RUIDO SUBMARINO PRODUCIDO POR DRAGADOS EN PUERTOS DE POCO CALADO



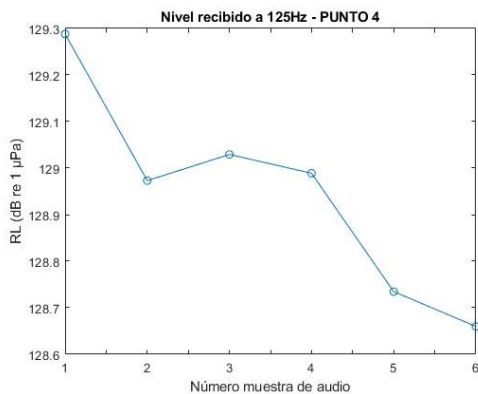
Para 63 Hz no hemos conseguido localizar el tono, pero en las propias gráficas de 125Hz se ve muy claro el tono de 126Hz. Las escogidas son las siguientes:



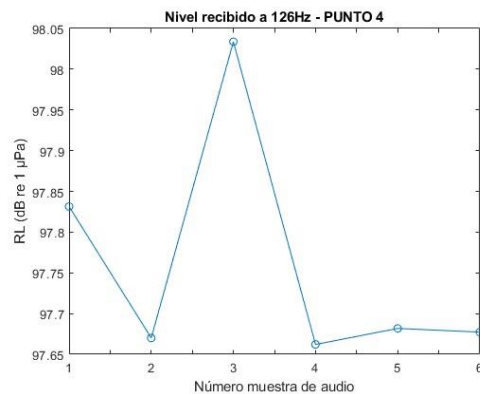
Tras el procesado de las señales, estos son los resultados:

MEDIDA 2 PUNTO 4 - Urec384K

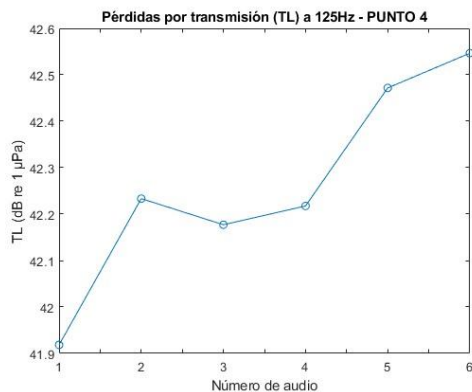
RL _{125Hz} - Promedio recepción	128.9dB re 1 μ Pa $\pm$ 0.2
TL _{real 125 Hz}	42.2dB re 1 μ Pa $\pm$ 0.2
TL _{teórico_cilindrica_196.5m_125Hz}	22.9 dB re 1 μ Pa
TL _{teórico_cilindrica-esférica_196.5m_125Hz}	34.4 dB re 1 μ Pa
TL _{teórico_esféricaz_196.5m_125Hz}	45.9dB re 1 μ Pa
RL _{teórico_cilindrica_196.5m_125Hz}	148.3 dB re 1 μ Pa $\pm$ 0.1
RL _{teórico_cilindrica-esférica_196.5m_125Hz}	136.8 dB re 1 μ Pa $\pm$ 0.1
RL _{teórico_esférica_196.5m_125Hz}	125.3dB re 1 μ Pa $\pm$ 0.1
RL _{63Hz} - Promedio recepción	97.8dB re 1 μ Pa $\pm$ 0.1
TL _{real 63 Hz}	56.4dB re 1 μ Pa $\pm$ 0.1
TL _{teórico_cilindrica_196.5m_63Hz}	22.93 dB re 1 μ Pa
TL _{teórico_cilindrica-esférica_196.5m_63Hz}	34.40 dB re 1 μ Pa
TL _{teórico_esférica_196.5m_63Hz}	45.87 dB re 1 μ Pa
RL _{teórico_cilindrica_196.5m_63Hz}	131.26 dB re 1 μ Pa $\pm$ 0.03
RL _{teórico_cilindrica-esférica_196.5m_63Hz}	119.79 dB re 1 μ Pa $\pm$ 0.03
RL _{teórico_esférica_196.5m_63Hz}	108.32 dB re 1 μ Pa $\pm$ 0.03



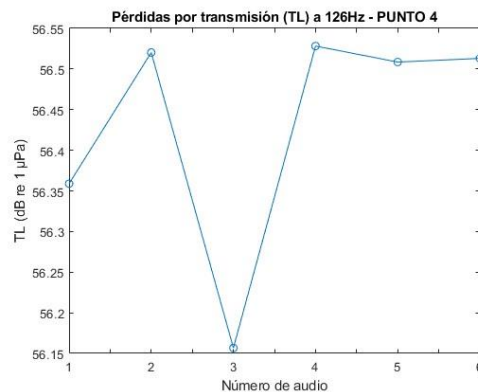
Gráfica 11: RL125hz - PUNTO 4



Gráfica 12: RL 126 Hz- PUNTO 4



Gráfica 13: TL 125Hz – PUNTO 4



Gráfica 14: RL 126 Hz – PUNTO 4

En este punto, la medida de nuevo vuelve a tener un nivel de ruido alto. A pesar de ello, la incertidumbre es baja.

En una distancia de 196.5 metros (distancia entre el emisor y el receptor del punto 4) existen unas pérdidas por transmisión de $TL_{real\ 125\ Hz} = 42.2\ re\ 1\ \mu Pa$ a 125Hz y $TL_{real\ 126\ Hz} = 56.4\ dB\ re\ 1\ \mu Pa$ a 126Hz. Una vez más, los cálculos teóricos, como más se aproximan, es con la propagación esférica.

- RESUMEN DE MEDIDAS

En la siguiente tabla, se combinarán todos los resultados de las medidas para poder compararlas mejor:

		<i>dB re 1 µPa @1 m</i>	SL 125Hz	SL 63Hz	RL 125Hz	RL 126Hz	TL 125Hz	TL 126Hz
M1	REFERENCIA	(tinglado UPV)	171.2	154.19	-	-	-	-
M1	PUNTO 3	(enfrente)	-	-	91	77	80	76
M2	PUNTO 1	(pantalán UPV)	-	-	122.7	100.4	48.4	53.7
M2	PUNTO 4	(parquin)	-	-	128.9	97.8	42.2	56.4

Tabla 3: Resultados de medidas

Como podemos ver, por lo general se transmiten mucho peor las frecuencias graves. Anteriormente, ya hemos mencionado que esto es debido a que es un puerto pequeño y esto no permite tener grandes longitudes de onda. Por suerte, el primer armónico se puede apreciar correctamente, aunque no se reciba tan bien como el tono de 125Hz. Por otro lado, tenemos una mejor transmisión en la dirección paralela al tránsito del puerto que en la dirección perpendicular. También es destacable que en el punto 4 existen menos pérdidas que en el punto 1. Esto es debido a que el puerto en la zona izquierda (punto 4) se estrecha y en la zona derecha se va ensanchando hasta la bocana. También va aumentando la profundidad conforme nos acercamos a esta zona del puerto.

6.3. Resultados de la simulación ⁸

En primer lugar, es necesario explicar que la simulación se ha hecho con los ficheros del repositorio *Acoustics Toolbox* que proporciona la *Ocean Acoustics Library* (OALIB, a partir de ahora). Este paquete de códigos fuente trae las funciones de Matlab necesarias

⁸ Nota: todos los archivos necesarios para realizar la simulación se encuentran en la carpeta Ficheros Anexos>Simulacion Puerto Gandía

para simular distintos métodos, así como algunos ejemplos. No obstante, para el correcto funcionamiento es necesario tener un terminal de comandos instalado para compilar los ficheros y posteriormente ejecutarlos y visualizarlos desde Matlab. En nuestro caso hemos instalado *Cygwin* ya que era uno de los que recomendaban las propias instrucciones de instalación de la web. Además, ha sido necesario crear adaptaciones de algunos de los *scripts* que ofrece el paquete. En nuestro caso, se ha tenido que adaptar la función el '*shdpol.m*' para poder crear otra que representara los valores en gráficas de ejes cartesianos y no polares. Todos estos archivos están adjuntos en la carpeta "Ficheros Anexos">" Simulacion Puerto Gandia".

Es importante resaltar, que por motivos ajenos a nuestro conocimiento (motivos relacionados con la arquitectura de Intel básica) hay *scripts* y funciones que no funcionan dependiendo del ordenador que las procese. Se han hecho pruebas con distintos ordenadores y con los mismos códigos y dependiendo del ordenador.

Como hemos explicado en el apartado § 5.2. se van a realizar las simulaciones de forma coherente, semicoherente e incoherente. Para poder llevar a cabo esto, es necesario cambiar la línea 22 del código del fichero '*.env*'.

En este documento vamos a incluir las gráficas del mapa aplicado a la batimetría del puerto que se crea con las pérdidas por transmisión (TL) a diferentes profundidades.

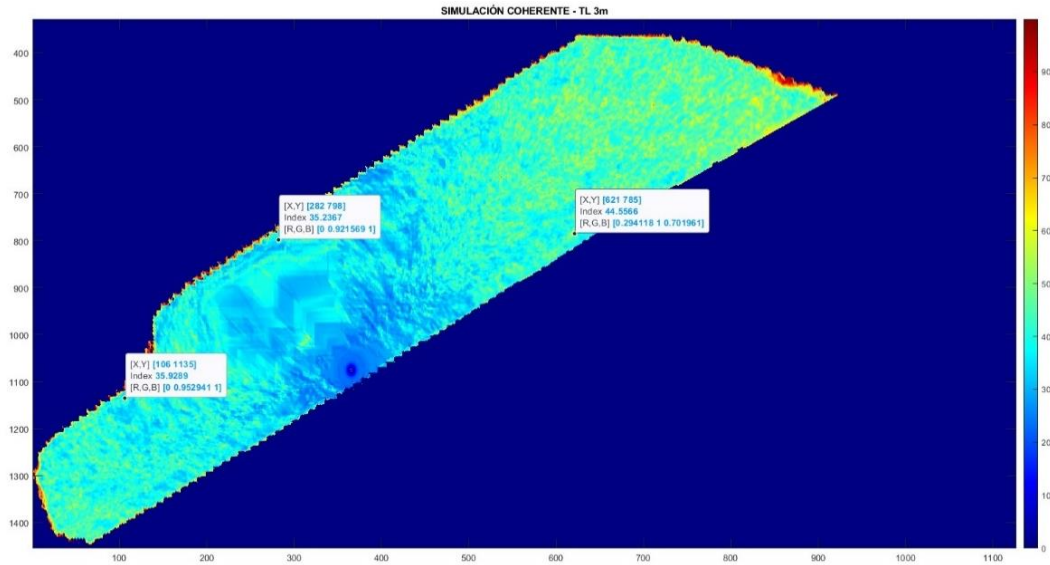
- SIMULACIÓN COHERENTE A 63Hz

Dentro de la simulación coherente (aquella que tiene en cuenta tanto el margen superior como el inferior), vamos a ver tres cortes longitudinales. Primero a la profundidad de 3 metros, seguidamente a la de 5 metros y finalmente a la de 10 metros. En la gráfica se representan las pérdidas por transmisión (TL). Como veremos a continuación, según va aumentando la profundidad, la simulación abarca menos espacio. Esto es porque no tenemos que olvidar la batimetría del puerto de Gandía. Es poco profunda y esta aumenta conforme nos desplazamos hacia bocana.

También hay que tener en cuenta que el programa de simulación no tiene en cuenta las paredes del puerto, es decir, las reflexiones solo son con los márgenes superiores e inferiores (dependiendo de si es coherente, incoherente y semicoherente) no se tiene en cuenta los márgenes laterales. Esto es porque simula con una propagación rectilínea desde la posición de fuente.

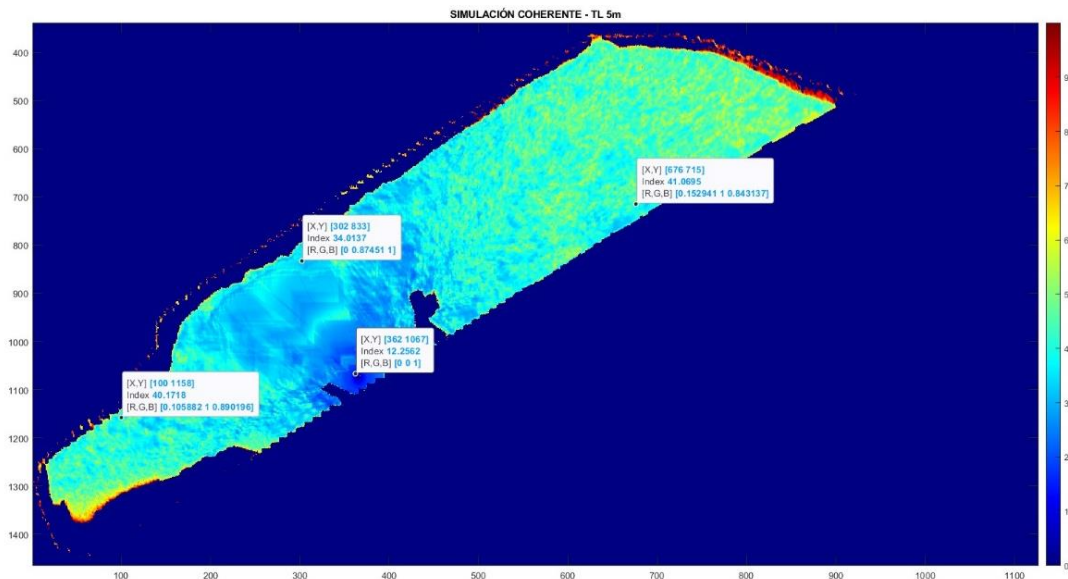
Recordamos de nuevo: al estar representadas las pérdidas por transmisión, cuanto mayor es el valor, más se está perdiendo y por tanto menos se está transmitiendo.

Los resultados gráficos obtenidos son los siguientes:



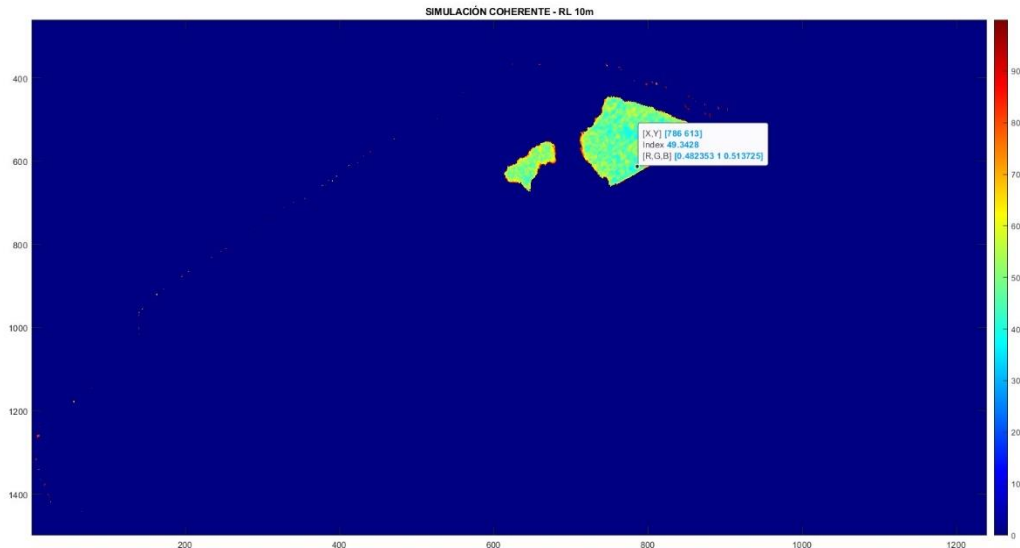
Gráfica 15: Simulación coherente – TL 3m – 63Hz

A tres metros la representación sale completa. Como podemos ver en el valor *Index*, tenemos un TL de 35.5 dB en el punto 4 y el punto 3 y aumentan conforme nos desplazamos hacia afuera del puerto. Esto se ve reflejado en la *Gráfica 15* con los tonos amarillos y, como podemos ver, el valor aumenta a 44.5 dB en el punto 1.



Gráfica 16: Simulación coherente – TL 5m – 63Hz

A 5 metros de profundidad empiezan a ver recortes en el área simulada, como es lógico. También aumentan las pérdidas, sobre todo en el punto 4 y añadimos el punto cerca de la fuente para ver cuánto se pierde a escasos metros. En conclusión, de esta simulación, nos seguimos moviendo sobre los 40 dB de pérdidas.



Gráfica 17: Simulación coherente – 10 m – 63Hz

Por último, a 10 metros de profundidad la simulación es mínima, ya que estas profundidades se comienzan a dar en el puerto en la zona de bocana y fuera de ella. Recordamos que la profundidad máxima del puerto es 11.5m.

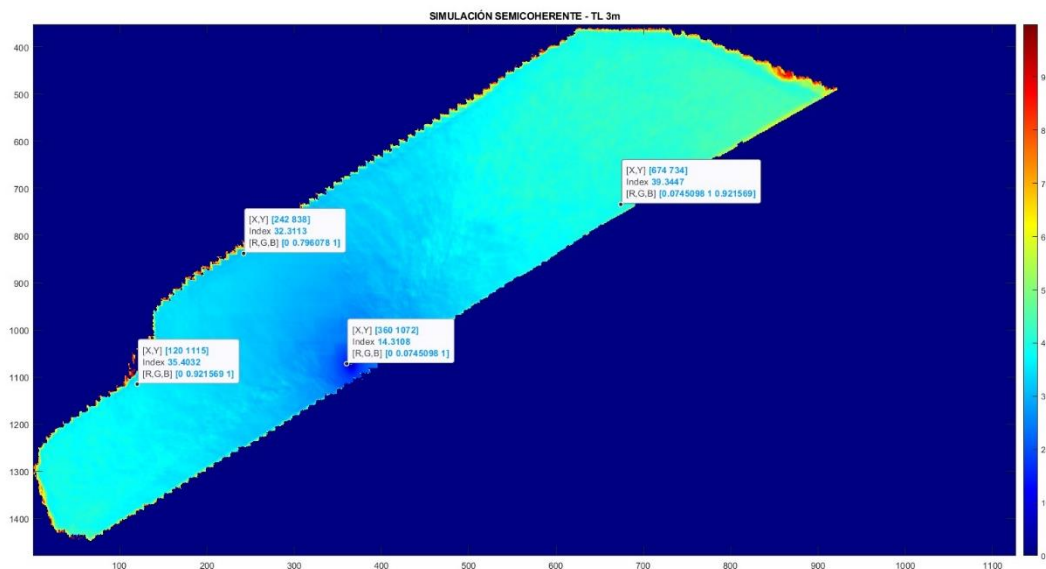
Si recordamos la batimetría del puerto, falta una parte por representar, esto es debido a lo comentado anteriormente que no tiene en cuenta las reflexiones con las paredes laterales del puerto.

Finalmente, cuando hayamos comparado todas las gráficas de resultados se hará una valoración general comparando con la medida real.

- SIMULACIÓN SEMICOHERENTE A 63Hz

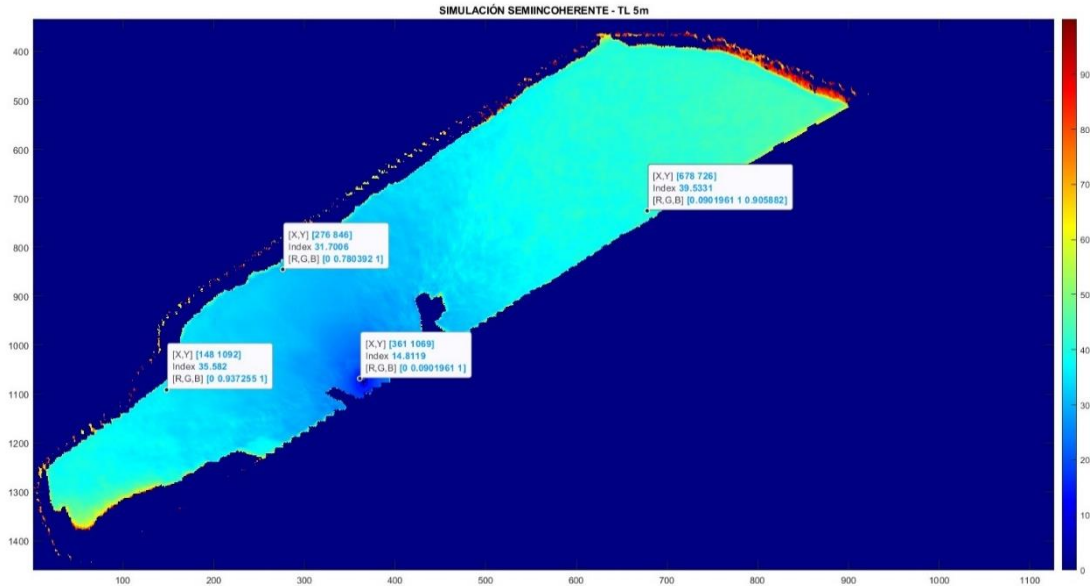
La simulación semicoherente tiene en cuenta solamente el fondo, no tiene en cuenta la reflexión con el margen superior del agua.

Las gráficas obtenidas son las siguientes:



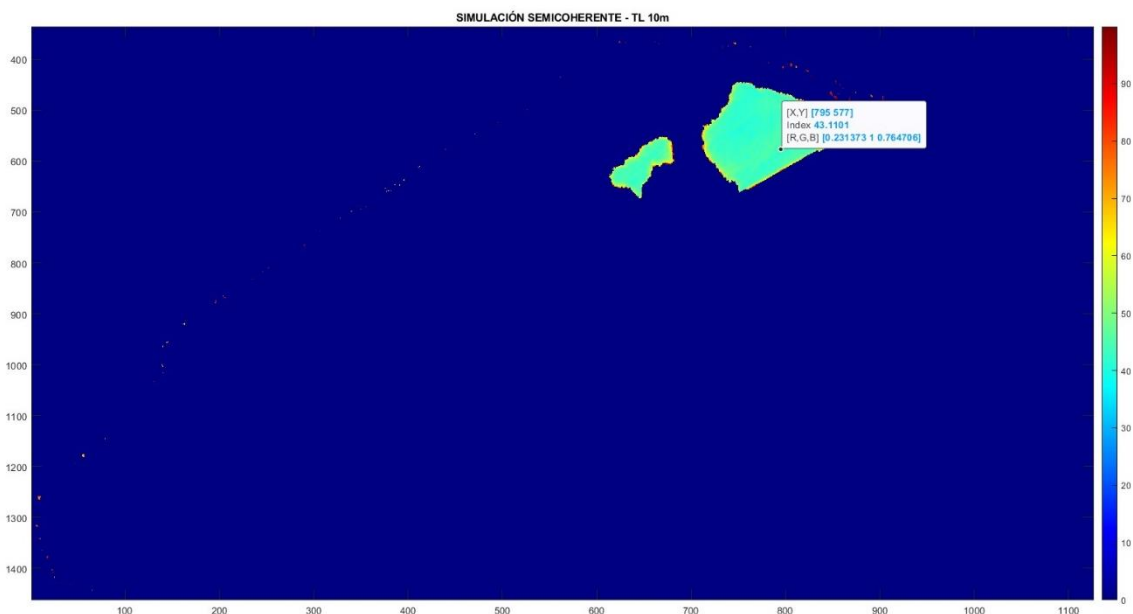
Gráfica 18: Simulación semicoherente – 3 m – 63Hz

Como podemos ver ahora la simulación es mucho más suave, no tiene cambios tan abruptos. Esto es debido a que solo está teniendo en cuenta las reflexiones del fondo. Esta simulación tiene en el punto 1, 39.3 dB de pérdidas por transmisión; en el punto 3, 32.3dB y en el punto 4, 35.4dB. Comparando con simulación coherente, los niveles son más bajos y, por lo tanto, se transmite mejor la señal.



Gráfica 19: Simulación semicoherente – 5 m – 63Hz

A 5 metros de profundidad tenemos en el punto 1, 39.5dB; en el punto 3, 31.7 y en el punto 4, 35.6 dB. A esta profundidad los niveles son aún más homogéneos. En la gráfica, se ve reflejado en el poco cambio de color que existe.

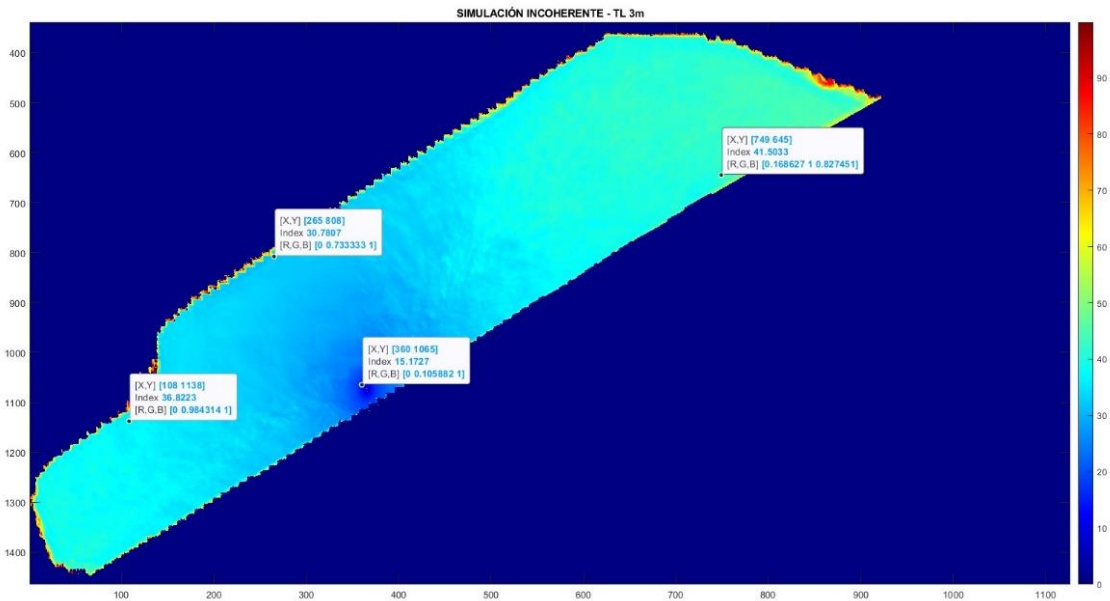


Gráfica 20: Simulación semicoherente – 10 m – 63Hz

A 10 metros de profundidad, ocurre lo mismo que va a ocurrir en todas las simulaciones, las zonas son mínimas y por tanto hay muy poco tramo simulado. Aun así, sabemos que a esta profundidad habrá sobre 43.1 dB de pérdidas por transmisión.

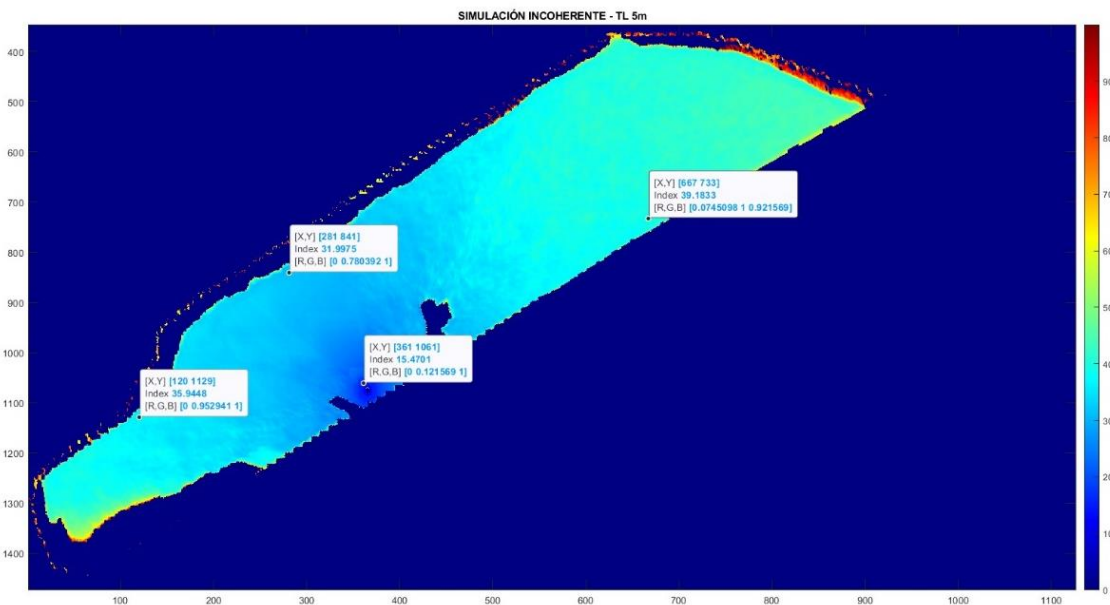
- SIMULACIÓN INCOHERENTE A 63Hz

La simulación incoherente no tiene en cuenta ni los márgenes inferiores ni los superiores. Las gráficas de las simulaciones son las siguientes:



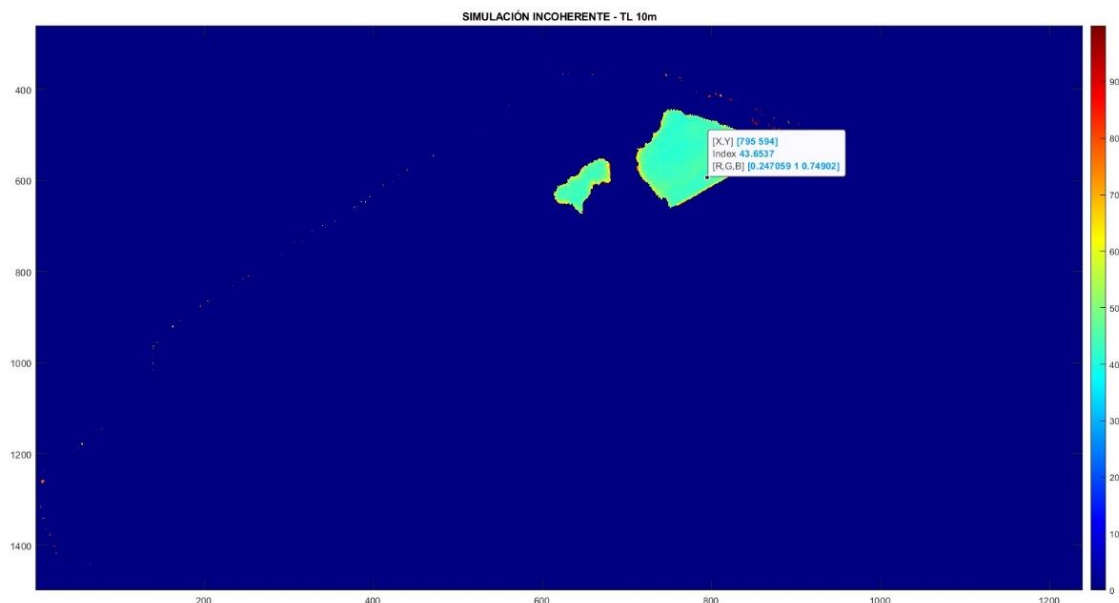
Gráfica 21: Simulación incoherente – TL 3m – 63Hz

En la Gráfica 21, podemos ver representadas las pérdidas del puerto aún más suaves que en los casos anteriores. El color (y, por tanto, las pérdidas) se distribuye y va disminuyendo homogéneamente igual que en el caso anterior. Los valores son muy parecidos a los obtenidos con la simulación semicoherente. Ahora en el punto 4 tenemos 36,8dB; en el 3, 30.78dB y en el 1, 41.50dB.



Gráfica 22: Simulación incoherente – TL 5m – 63Hz

En la simulación a 5 metros de profundidad apenas difiere de la de a 3 metros de profundidad. Se ha escogido un punto 1 más cercano a la fuente para ver la diferencia que había entre estar más alejado o acercado y en estos casos es de 3 dB aproximadamente.



Gráfica 23: Simulación incoherente – TL 10m – 63Hz

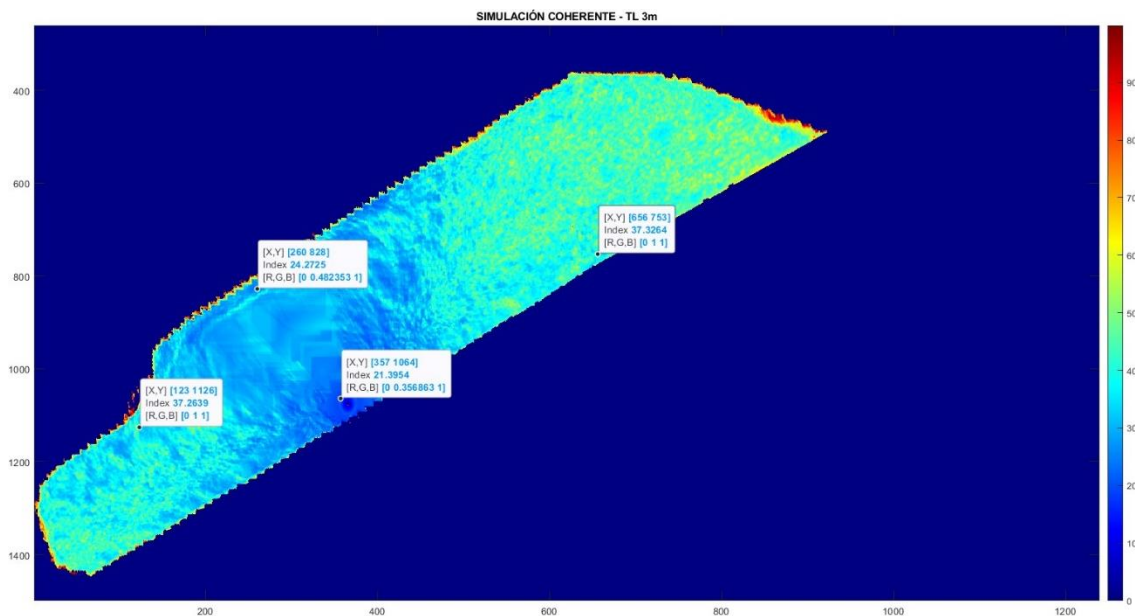
Por último, la simulación a 10 metros representa las pérdidas prácticamente iguales en toda la superficie en el valor de 43,6 dB.

Cabe destacar como pequeña conclusión a este apartado de simulación a 63Hz que, como hemos comentado anteriormente, el método de simulación por rallo Bellhop no es el más adecuado para bajas frecuencias ni para aguas someras. Después se hará una comparación de todos los resultados para ver cuánto difieren de los reales.

- SIMULACIÓN COHERENTE A 125Hz

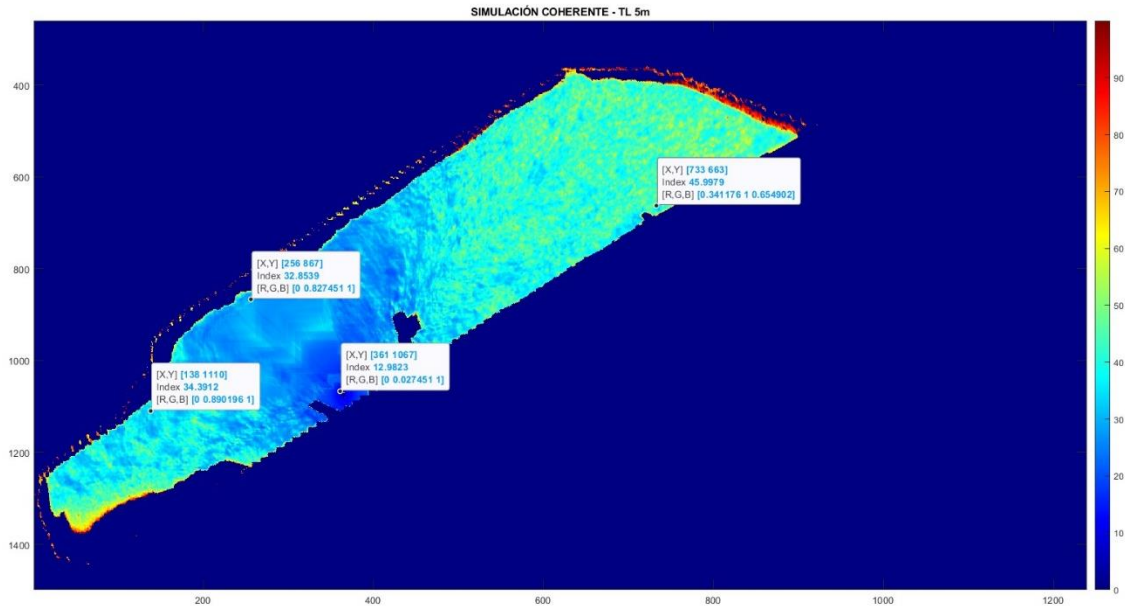
La simulación a 125Hz sigue la misma dinámica que la realizada con 63Hz.

Comenzando con la gráfica de 3m:



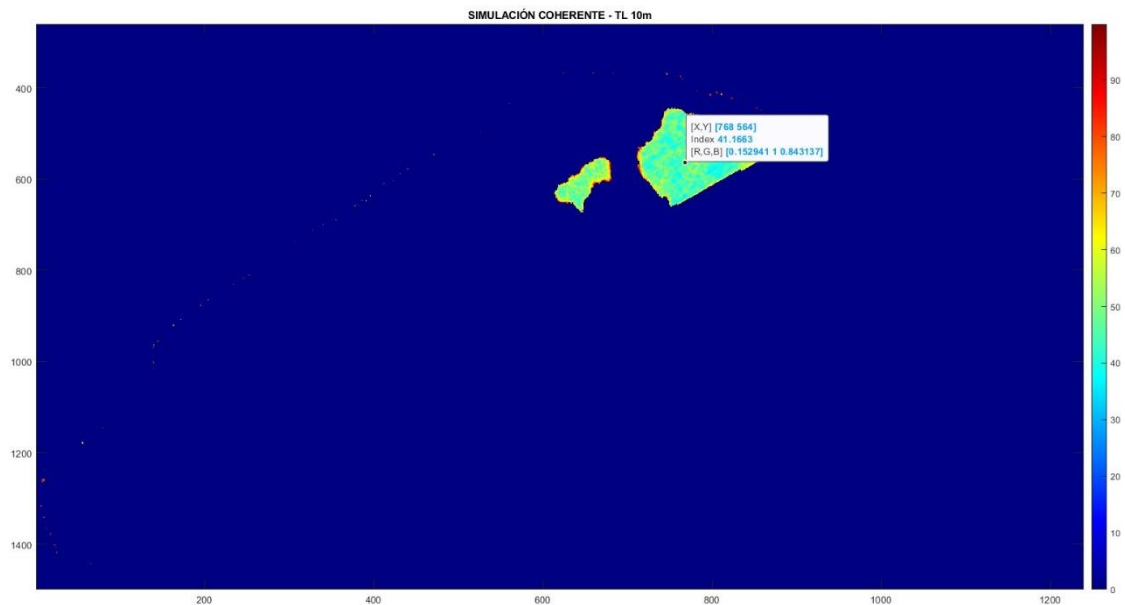
Gráfica 24: Simulación coherente – TL 3m – 125Hz

Podemos ver que volvemos a tener una gráfica similar a la obtenida en la simulación coherente a 63Hz. Los cambios no son suaves, lo cual es lógico debido a las reflexiones que existen con los márgenes superiores e inferiores. En el punto 1, tenemos 37.3 dB de pérdidas por reflexión; en el punto 3, 24.3 dB y en el punto 4, 37.3 dB. Comparado con las pérdidas conseguidas en la simulación coherente a 63 Hz, estos valores son menores, pero esta comparación se comentará mejor al final de este apartado.



Gráfica 25: Simulación coherente – TL 5m – 125Hz

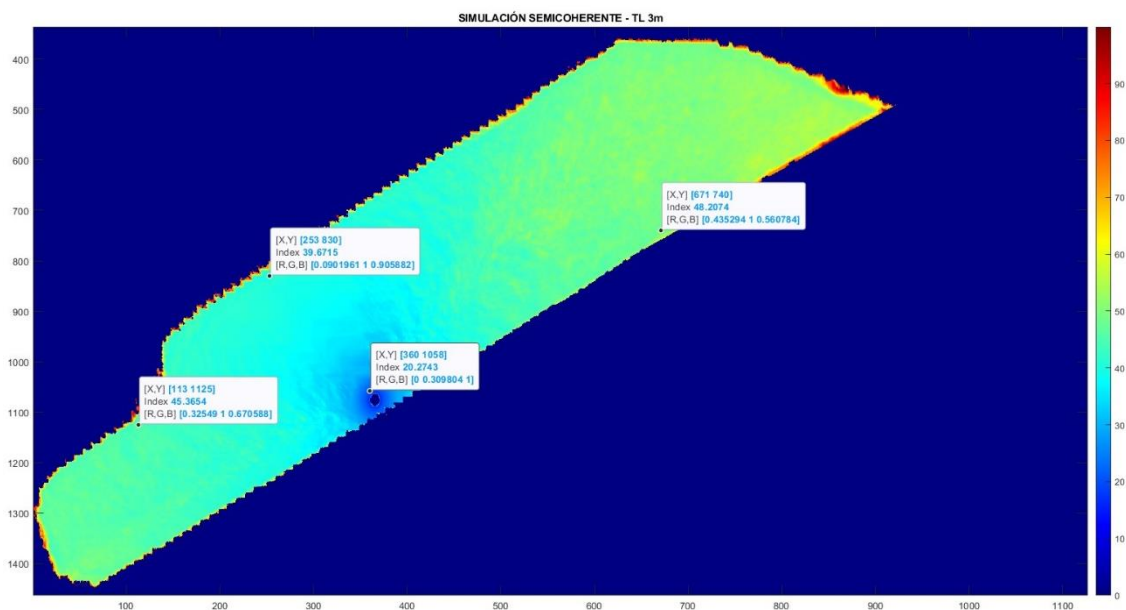
A 5 metros de profundidad los valores aumentan, las pérdidas ahora son mayores. Esto es normal porque aumenta la profundidad. En el punto 1 tenemos 46 dB; en el punto 3, tenemos 32.9 dB y en el punto 4, 34.5 dB.



Gráfica 26: Simulación coherente – TL 10m – 125Hz

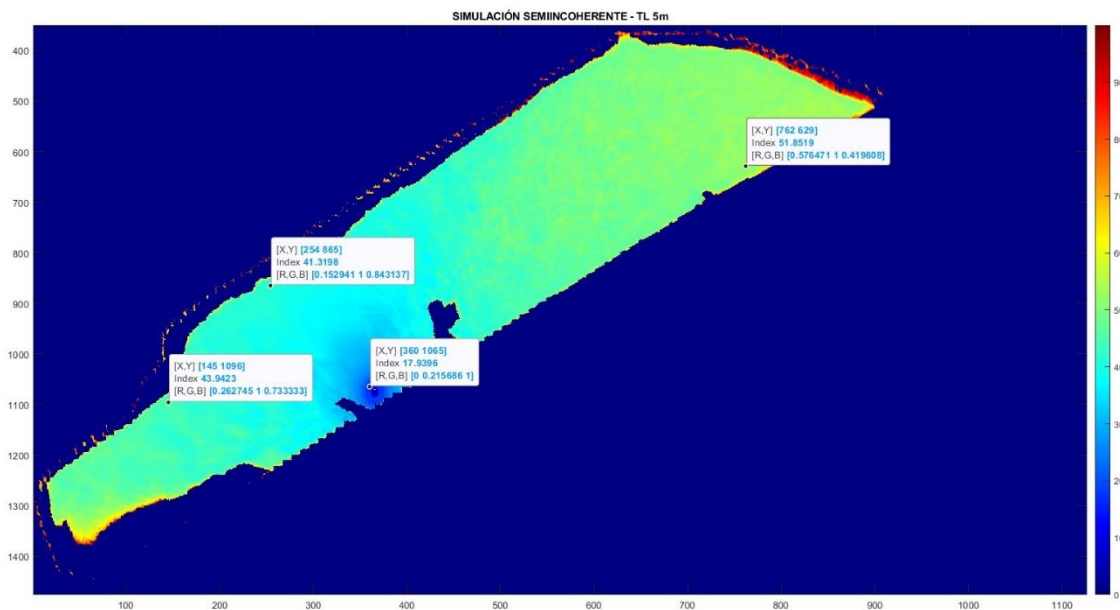
A 10 metros de profundidad tenemos un nivel aproximado de 41.2 dB.

- SIMULACIÓN SEMICOHERENTE A 125Hz



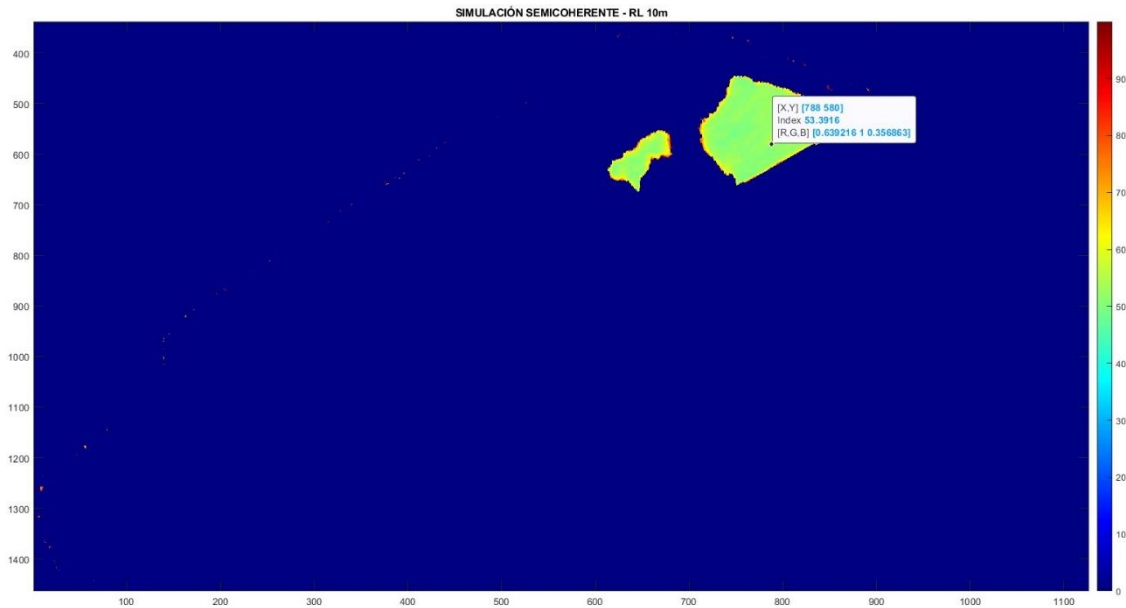
Gráfica 27: Simulación semicoherente – TL 3m – 125Hz

A 3 metros la simulación semicoherente cambia respecto a la coherente. En el punto 1, las pérdidas por transmisión 48.2 dB; en el punto 3, 39.7 dB y en el punto 4, 45.4 dB. Las pérdidas aumentan considerablemente respecto a la simulación coherente anterior.



Gráfica 28: Simulación semicoherente – TL 5m – 125Hz

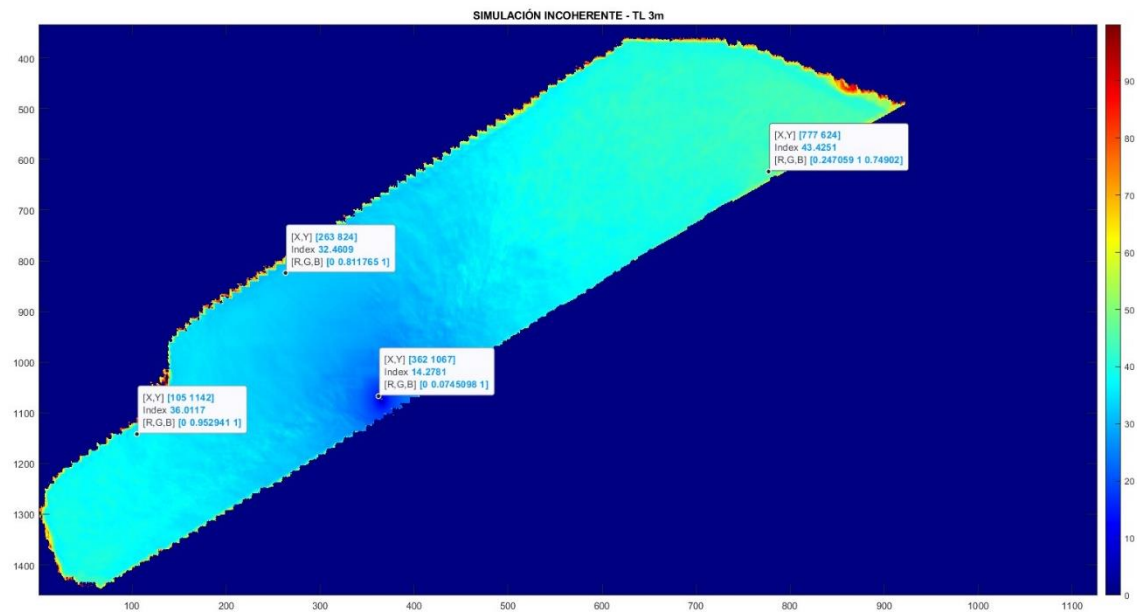
A 5 metros de profundidad la dispersión es parecida. Hay que tener en cuenta que estamos más cerca de la fuente porque a 3 metros nos podemos acercar más a los extremos reales que a 5 metros. Así obtenemos en el punto 1, 51.9 dB; en el punto 3, 41.3 dB y en el punto 4, 43.9dB.



Gráfica 29: Simulación semicoherente – TL 10m – 125Hz

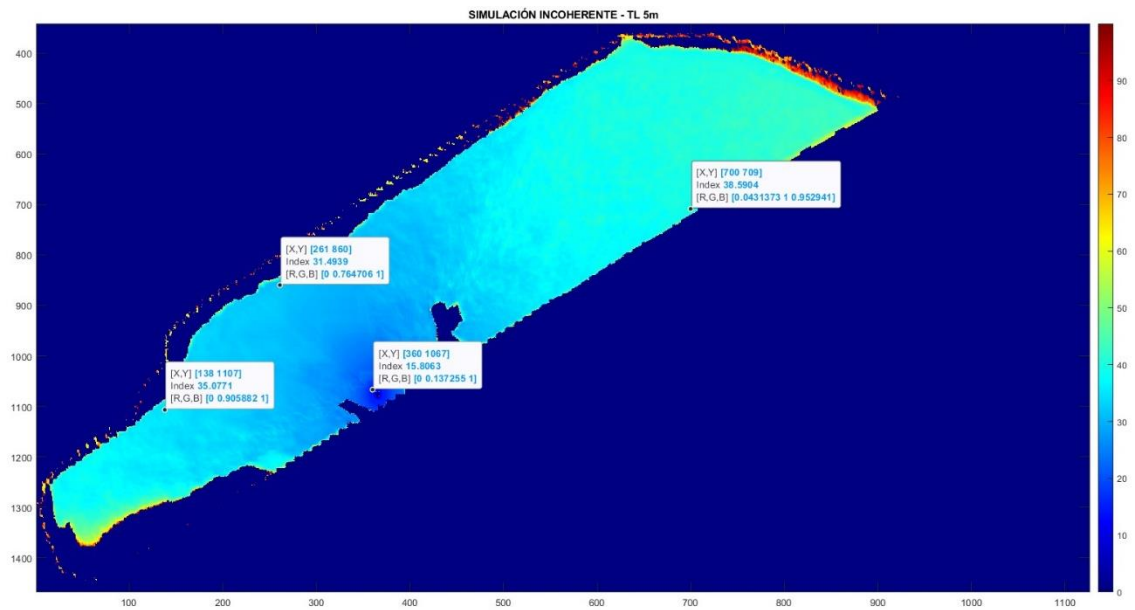
Por último, a 10 metros no tenemos prácticamente variación de nivel. La apreciación del cambio de tono es mínima comparada con la simulación coherente. El nivel de pérdidas por transmisión en esta zona es aproximadamente 53.4dB.

- SIMULACIÓN INCOHERENTE A 125Hz



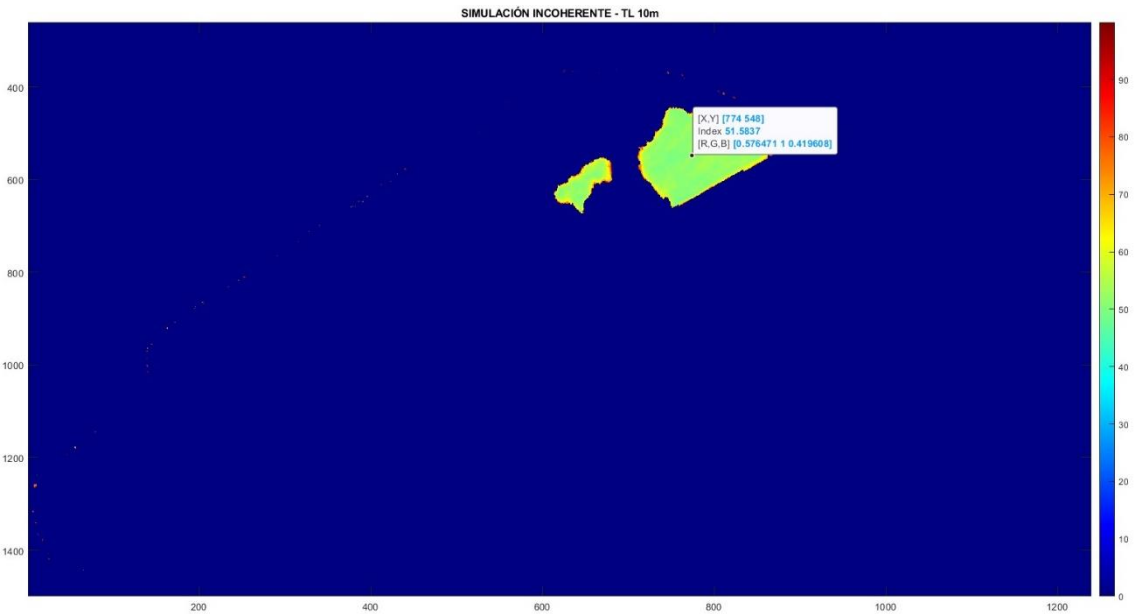
Gráfica 30: Simulación incoherente – TL 3m – 125Hz

La simulación incoherente vuelve a sufrir un cambio significativo respecto a la semicoherente. Ahora las pérdidas aumentan más suavemente. En el punto 1, tenemos 43,4 dB de pérdidas por transmisión; en el punto 3, 32.5 dB y en el punto 4, 36.0 dB.



Gráfica 31: Simulación incoherente – TL 5m – 125Hz

A 5 metros ocurre similar a lo que ocurre en la gráfica anterior. En el punto 1 hay 38.6 dB; en el punto 3, 31.5dB y en el punto 4, 35.0 dB. Estos valores son muy similares a los que tenemos a 3 metros de profundidad.



Gráfica 32: Simulación incoherente – TL 10m – 125Hz

Por último, a 10 metros de profundidad pasa lo mismo que en la simulación semicoherente. Prácticamente existe el mismo nivel en toda la zona. Este nivel es de 51.6 dB.

De nuevo, y como ya hemos anticipado, volvemos a combinar en una tabla los resultados. En este caso, comparamos las pérdidas por transmisión de las medidas en el puerto con las hechas en cada tipo de simulación.

a 3 metros	MEDIDAS PUERTO	SIMULACIÓN COHERENTE	SIMULACIÓN SEMICOHERENTE	SIMULACIÓN INCOHERENTE
<i>dB re 1 μPa</i>	TL 126Hz	TL 63Hz	TL 63Hz	TL 63Hz
PUNTO 1	53.8	44.5	39.3	41.5
PUNTO 3	76	35.2	32.3	30.7
PUNTO 4	56.4	35.9	35.4	36.8

Tabla 4: Pérdidas por transmisión medidas y simuladas a 63Hz

a 3 metros	MEDIDA PUERTO	SIMULACIÓN COHERENTE	SIMULACIÓN SEMICOHERENTE	SIMULACIÓN INCOHERENTE
<i>dB re 1 μPa</i>	TL 125Hz	TL 125Hz	TL 125Hz	TL 125Hz
PUNTO 1	48.4	37.3	48.2	43.4
PUNTO 3	80	24.3	39.7	32.5
PUNTO 4	42.2	37.3	45.4	36.0

Tabla 5: Pérdidas por transmisión medidas y simuladas a 125 Hz

Antes de centrarnos en las frecuencias por separado, como ya hemos comentado, hay que tener en cuenta que el método de simulación por rayos Bellhop no se considera válido en aguas someras y en el puerto de Gandía tiene muy poca profundidad. A pesar de ello, sirve como aproximación para evaluar las pérdidas por transmisión. En esta comparación trabajaremos con profundidad de 3 metros ya que es la más significativa porque la simulación incluye los puntos aproximados en los que nosotros medimos.

Comenzando por la frecuencia de 63Hz, podemos ver que donde difieren los resultados respecto a la medida real es sobre todo en el punto 3, en menor medida el punto 4. Donde más coinciden es en el punto 1. Hay que tener en cuenta que estamos comparando diferentes frecuencias. Aunque sea el armónico, es lógico que no coincida. Por otro lado, sorprende que, en el punto 3, es donde hemos registrado más pérdidas en las medidas y en la simulación sea donde menos. Puede ser debido a la cantidad de ruido de fondo que registramos en las medidas del puerto y que la simulación no lo esté teniendo en cuenta. Dentro de la gran disparidad que existe de resultados, la simulación coherente es la que más se aproxima a la medida real. A pesar de todo esto, la simulación que más se acerca a los resultados reales es la coherente.

Para la medida a 125 Hz, en primer lugar, tenemos que comentar que con la simulación semicoherente en el punto 1 coincidimos con la medida real. En el punto 3, la diferencia es abismal y, en el punto 4, es aproximado. En comparación con la simulación a 63 Hz, esta es más exacta respecto a la medida. No obstante, se recomienda hacer una simulación de modos normales para poder tener una mejor aproximación.

7. Conclusiones

Nos encontramos en una crisis climática producida por el daño antropológico. El ecosistema marino no es para nada inmune a ello y es uno de los que más afectado se ve y menos se cuida. Con el ligero repaso que hemos realizado sobre los documentos legales existentes podemos ver que no hay ningún organismo, ni ningún documento regulador en España que marque las directrices que hay que seguir para no afectar al medio marino en ámbitos acuáticos.

Por suerte, gracias a este proyecto aplicado en el puerto de Gandía, hemos visto que existen grandes pérdidas por transmisión y que a pocos metros llega menos de la mitad de la señal. No obstante, sí que es preocupante el nivel de ruido de fondo que hemos

registrado en las medidas y el posible impacto que puede tener en la fauna marina. La mayoría de estos ruidos son producidos por el tránsito de barcos. Se debería hacer mucho hincapié en estas líneas e investigar sobre ello y, sobre todo, tener una ley que regule los niveles y dé unas directrices claras de medidas, de manera similar a lo que se hace para el ruido aéreo.

Por otro lado, pero también ligado a esto, es sorprendente lo tedioso y delicado que es realizar simulaciones subacuáticas. Comparándolo de nuevo con el ruido aéreo, de esto existen grandes softwares que se usan continuamente para hacer simulaciones de ruido para carreteras, ciudades, casas... Trabajar con estos *scripts* es un gran avance para la acústica submarina, pero la dificultad de su uso hace que sea muy limitado. Cabe mencionar que sí se han encontrado softwares de simulación subacuáticos, pero no están tan implementados en el día a día al nivel de los de ruido aéreo. La investigación sobre estos se deja para futuras líneas de ampliación de este trabajo.

La acústica subacuática ha dado un gran avance en pocos años, pero es necesario ampliar muchísimo más la investigación, pero, sobre todo, es necesario aumentar la aplicación. La investigación muchas veces va ligada a la oferta y la demanda. En este caso existe una demanda reciente debido a la transposición de la normativa europea, a pesar de ello, existe poca oferta de servicios y de programas de simulación *user-friendly*. Se prevé que este sector se desarrollará y se podrá llegar a un punto equilibrado entre esta oferta y demanda mencionada.

8. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030

 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE		ALTO	MEDIO	BAJO	NO PROCEDE
 1 FIN DE LA POBREZA	Objetivo 1: Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo				x
 2 HAMBRE CERO	Objetivo 2: Poner fin al hambre				x
 3 SALUD Y BIENESTAR	Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades		x		
 4 EDUCACIÓN DE CALIDAD	Objetivo 4: Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos				x
 5 IGUALDAD DE GÉNERO	Objetivo 5: Lograr la igualdad entre los géneros y empoderar a todas las mujeres y las niñas				x
 6 AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO	Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos		x		

	Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna				X
	Objetivo 8: Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos		X		
	Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación	X			
	Objetivo 10: Reducir la desigualdad en y entre los países				X
	Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles	X			
	Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles				X
	Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos				X
	Objetivo 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos	X			
	Objetivo 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad				X
	Objetivo 16: Promover sociedades justas, pacíficas e inclusivas				X
	Objetivo 17: Revitalizar la Alianza Mundial para el Desarrollo Sostenible				X

Tabla 6: Objetivos de desarrollo sostenible.

9. Referencias

- [1] Autoridad Portuaria de Valencia. (2020). Propuesta de delimitación de los espacios y usos portuarios (DEUP) del puerto de Gandía.
- [2] Cepas Gil, A. (2019). *La contaminación acústica subacuática y su afectación a los cetáceos. El marco regulatorio actual.*
- [3] del Estado, J. (2003). *LEY 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. Ley. Jefatura del Estado.*
- [4] del Estado, J. (2007). *Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.*
- [5] de Salamanca Sánchez-Cámara, Á. E. (2014). *Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. Foresta, (60), 82-87.*
- [6] Dinámica Ambiental (2015). *Dragados en el sistema portuario andaluz. Método para la gestión y toma de decisiones.*
- [7] Durán, C., Acuña, R., Mejuto, V., González, M., Blanco, M., Pereira, V. (2017). *Estudio de impacto ambiental para el dragado del puerto de Laxe (A Coruña).*
- [8] Hovem, JM y Dong, H. (2019). Comprensión de la acústica oceánica mediante análisis de rayos propios. *Journal of Marine Science and Engineering.*
- [9] Juan, A. (1997). *La teoría de rayos y sus aplicaciones.* Depto. De Sismología, División de Ciencias de la Tierra.
- [10] Lurton, X. (2002). *An introduction to underwater acoustics: principles and applications.* Springer Science & Business Media.
- [11] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2012). *Documento técnico sobre impactos y mitigación de la contaminación acústica marina.* Madrid.
- [12] Organización Marítima Internacional. (2020). *El ruido procedente de los buques.* <https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Paginas/Noise.aspx> (Último acceso 05/06/2024).
- [13] Porter, MB (2011). Manual y guía del usuario del botones: borrador preliminar. *Heat, Light, and Sound Research, Inc., La Jolla, CA, EE. UU., Tech. Rep , 260 .*
- [14] Porter, M. B. (2016). Bellhop3d user guide. *Technical report, Heat, Light, and Sound Research Inc.*
- [15] Redondo, L., y Mateo, A. R. (2017). Ruido subacuático: fundamentos, fuentes, cálculo y umbrales de contaminación ambiental. *Revista Digital del Cedex, (186), 73-73.*

- [16] Richardson, W.J. (1995). Documented Disturbance Reactions (pp. 241-324). En W.J. Richardson, C.R. Greene, C.I. Malme y D.H. Thomson (eds.), *Marine Mammals and Noise*. San Diego, CA (EEUU): Academic Press.
- [17] Sánchez, M., Madrid, El, Felis, I. y Martínez, R. (2020). *Guía de buenas prácticas para la medición de sonido submarino*. Fundación Biodiversidad y CTN.
- [18] Servicio de Evaluación Ambiental. (2022). *Criterio de evaluación en el SEIA: Predicción y evaluación de impactos por ruido submarino*.
- [19] Tárrega, R. (22/2/2024). Valenciaport da el pistoletazo de salida a la futura ampliación del puerto de Gandía. *Diario del Puerto*.
- [20] ¿Qué es la picnoclina? (2023). Ecosistema global. <https://ecosistemaglobal.org/2023/10/24/que-es-la-picnoclina/>. (Último acceso 05/07/2024).

Referencias de imágenes:

- [Img.1] El Estrecho digital (7/11/2022). *La Autoridad Portuaria de Valencia adjudica la planta fotovoltaica del Puerto de Gandía*. <https://www.elestrechodigital.com/2022/11/07/la-autoridad-portuaria-de-valencia-adjudica-la-planta-fotovoltaica-del-puerto-de-gandia/>. (Último acceso 05/07/2024).
- [Img.2] Autoridad Portuaria de Valencia. (2020). *Propuesta de delimitación de los espacios y usos portuarios (DEUP) del puerto de Gandía*.
- [Img.3] Lurton, X. (2002). *An introduction to underwater acoustics: principles and applications*. Springer Science & Business Media.
- [Img.4] Hovem, JM y Dong, H. (2019). Comprensión de la acústica oceánica mediante análisis de rayos propios. *Journal of Marine Science and Engineering*.

Enlaces apartado § 6.1:

- [Enlace 1]: <https://lubell.com/VC2C.html>
- [Enlace 2] : <https://commerce.boschsecurity.com/us/en/PLE-1Pxx0-EU-Power-amplifier/p/F.01U.066.943/>
- [Enlace 3]: https://www.rohde-schwarz.com/es/productos/test-y-medida/osciloscopios/rs-rtm3000-oscilloscope_63493-427459.html
- [Enlace 4]: https://www.nautarc.it/EN/Hydrophones/NAUTA_systems/Underwater_Acoustic_Recorders/UREc384k/UREc384k.html
- [Enlace 5] : <https://www.bksv.com/es/transducers/acoustic/microphones/hydrophones/8103>
- [Enlace 6]: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1702.ashx>
- [Enlace 7]: https://www.rohde-schwarz.com/es/productos/test-y-medida/osciloscopios/rs-rtm3000-oscilloscope_63493-427459.html
- [Enlace 8]: <https://www.upv.es/noticias-upv/noticia-5747-samaruc-es.html>