

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Eval. y Seg. amb. de Ecos. marin. y cost



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Detección acústica de la tortuga boba (*Caretta caretta*) mediante técnicas activas”

Tipología: Trabajo de investigación

TRABAJO FINAL DE MASTER

Autor/a: **Enrique Alonso Alonso**

Tutor/a: **Isabel Pérez Arjona**

Cotutor/a: **Víctor Espinosa Roselló**

GANDIA, 2014

Resumen

Sobre una especie protegida, como son las tortugas marinas, para comprobar el éxito de los protocolos de protección y estimar el estado de conservación, es necesaria la realización de censos. Actualmente se realizan extrapolando datos de capturas accidentales y/o mediante avistamientos aéreos con un bajo valor estadístico, alto coste económico, y limitándose a los ejemplares en superficie. Las herramientas de la acústica submarina han sido utilizadas para detectar, monitorizar y evaluar cardúmenes de peces y otras especies marinas. La respuesta acústica de un objeto depende fundamentalmente de su geometría y composición, aumentando con el contraste de impedancias con el medio que lo rodea, es decir, el agua. El mayor contraste con el agua lo da el aire, por lo que las señales más intensas provienen de medios que lo contienen (peces con vejiga natatoria [1], cetáceos [2]). La presencia de pulmones en tortugas, hace suponer que su respuesta acústica sea identificable. Existen muy pocos trabajos sobre ello, y los que hay, no la cuantifican, siendo la finalidad del trabajo obtener la primera medida cuantitativa registrada y documentada de la respuesta acústica de una tortuga en libertad, primer paso para la identificación y evaluación de población de tortugas con herramientas acústicas.

Palabras clave:

Tortuga marina, acústica submarina, factor de blanco, ecoimpulso, sónar de barrido lateral.

Abstract

In order to check the success of protection protocols and estimate the condition of protected species such as sea turtles, censuses are necessary to be done. Nowadays, the censuses have been performed by extrapolating from bycatch and / or by aerial sightings with low statistical, high cost, limited to the specimen in the surface. Tools underwater acoustics have been used to detect, monitor and evaluate schools and other marine species. The acoustic return of an object depends primarily on the geometry and composition which increases with impedance contrast with the surrounding medium, in this case, water. The greatest contrast with the water is given by the air, so that the strongest signals come from media containing it (fish with swim bladder [1], cetaceans [2]). The presence of lungs in turtles, suggests that the acoustic response is identifiable. There are very few studies about this and it has not been quantified yet. Therefore the purpose of this study is to obtain the first recorded and documented quantitative measurement of the acoustic response of turtles in their natural habitate to distinguish them from other signals and to estimate the population with acoustic tools.

Key words: Sea turtle, underwater acoustics, target strength, echo impulse, side scan sonar.

Índice

1	Introducción	2
2	Materiales y métodos.....	7
2.1	Cálculo de la velocidad de propagación del sonido en el caparazón mediante la técnica de ecoimpulso.	
2.1.1	Descripción del método.....	7
2.1.2	Procedimiento experimental.....	9
2.2	Medida de la respuesta acústica de la tortuga boba mediante el uso de un sonar de barrido lateral.	
2.2.1	Descripción del método.....	11
2.2.2	Procedimiento experimental.....	14
2.2.2.1	Fase de preparación	
2.2.2.2	Obtención de medidas experimentales	
3	Resultados	18
3.1	Cálculo de la velocidad de propagación del sonido en el caparazón de la tortuga boba.....	18
3.2	Medida de la respuesta acústica de la tortuga boba mediante sónar de barrido lateral.....	23
4	Discusión de los resultados.....	30
5	Conclusiones.....	34
6	Bibliografía.....	35
7	Información complementaria	37

1. Introducción

La tortuga boba (*Caretta caretta*), es una tortuga marina pelágica que habita en océanos de todo el mundo. Su tamaño se encuentra alrededor de los 90 cm de longitud y su color de piel varía entre amarillo y marrón. El caparazón es normalmente de color marrón rojizo que adopta una forma hidrodinámica, aplanada y ovalada, con los laterales un tanto aserrados.

No existen diferencias externas de género hasta que el animal alcanza el estado adulto siendo en este caso la diferencia más obvia, que los machos tienen colas más gruesas y cortas, además de poseer uñas en forma de ganchos que les permiten anclarse al caparazón de la hembra.

La tortuga boba se distribuye prácticamente por todos los océanos del mundo (Fig. 1), ocupando las aguas cálidas de la banda intertropical sobre las que realiza desplazamientos grandes y complejos (se tienen evidencias de migraciones para la anidación de 14.500 km).



Figura 1. Distribución de los hábitats de la tortuga boba en los mares y océanos del mundo [3].

En el Mediterráneo (Fig. 2) está presente todo el año, aunque se producen concentraciones en diferentes zonas según la época del año como sucede en las costas españolas y extremo occidental, que aparecen en primavera y verano. Casi un 45 % de los ejemplares del Mediterráneo provienen del Atlántico, siendo en su mayoría juveniles. El resto corresponde a la propia población mediterránea donde tiene sus lugares de puesta en las cuencas central y oriental; Grecia es el sitio de anidación más popular del Mediterráneo, con unos aproximadamente 3000 nidos por año.

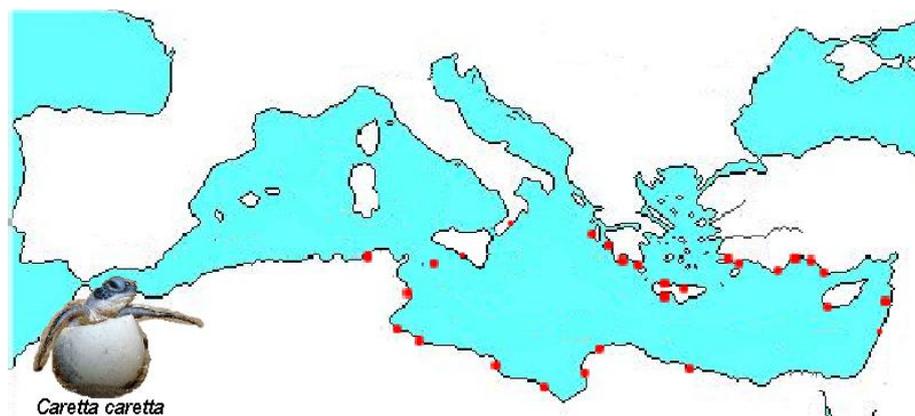


Figura 2. Zonas de desove de la tortuga boba (*Caretta caretta*) en el Mediterráneo [3].

Las tortugas son animales solitarios que nadan a poca profundidad aunque pueden pasarse hasta un 85% del tiempo sumergidas. De 15 a 30 minutos es el promedio de las inmersiones aunque pueden permanecer hasta 4 horas bajo la superficie, alimentándose principalmente, aunque es omnívora, de invertebrados bentónicos como gasterópodos, bivalvos o decápodos.

Presenta una baja tasa de reproducción. Las hembras realizan cuatro puestas para pasar a un estado de reposo reproductivo que puede durar hasta dos o tres años. La tortuga boba llega a la madurez sexual entre los 17 y 33 años viviendo un máximo de 67 años.

Tanto los huevos, como las crías después de la eclosión en la etapa de migración hacia el mar cuentan con numerosos depredadores; pueden ser devorados por cangrejos, serpientes, aves marinas... Ya en el océano, los depredadores de las crías de la tortuga boba pueden ser entre otros el pez loro, morenas y cangrejos. No obstante, las tortugas adultas apenas presentan depredadores naturales.

La tortuga boba, al igual que otras tortugas marina, es una de las especies consideradas en el inventario de la red Natura 2000 marina, creada a partir de La Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la flora y fauna silvestres, conocida como Directiva Hábitat, que es considerada una de las herramientas más importantes para la conservación de la biodiversidad en Europa y está considerada una especie protegida.

Las amenazas más importantes para las tortugas adultas tienen su origen en actividades antropogénicas. Una de las principales amenazas para estos reptiles, es la captura accidental debido al uso de artes de pesca no selectivos (Fig. 3), como el arrastre, redes de deriva o palangre, que provoca la muerte de entre 200000 y 300000 tortugas al año en todo el mundo. Se calcula que en España, la flota palangrera captura unas 20000 tortugas de las que mueren 4000 [4].



Figura 3. Principales amenazas de la tortuga boba, artes no selectivas, palangre (arriba)[5], redes (abajo)[6].

Otra de las grandes amenazas es la ingesta de plásticos. Teniendo en cuenta que cerca de 24.000 toneladas de plástico se vierten en el océano cada año y la capacidad omnívora de esta especie, es habitual encontrar en muchos cadáveres restos plásticos como bolsas (Fig. 4), láminas o líneas de pesca abandonadas, que suelen ser confundidas por los animales con otros elementos presentes en su dieta habitual (ej. medusas), y que no pueden ser digeridos.



Figura 4. Tortuga ingiriendo un residuo plástico [7].



Figura 5. Tortuga hallada muerta en la playa de Gandía 12/05/2014 (Fotografía propia).

También influyen negativamente el arrastre de fondo, la contaminación marina, los impactos contra embarcaciones que se producen durante los períodos de letargo en superficie, y la pérdida de los hábitats de puesta, las playas vírgenes, por la ocupación turística.

Actualmente, el método de estimación de la población de tortugas bobas en el Mediterráneo se limita a la extrapolación de datos obtenidos a partir de avistamientos directos o de las capturas accidentales, lo que proporciona una estadística muy limitada y dificulta valorar la población real de tortugas en el medio natural, además del elevado coste económico de los censos aéreos [8].

En estudios poblacionales, necesarios para la gestión de la protección de una especie, es conocido el uso de la acústica submarina para la identificación, evaluación y/o monitorización de cardúmenes de peces, plancton o biomasa submarina en general [1,9]. La intensidad de la señal recibida en los dispositivos acústicos tanto ecosondas verticales como sónares, viene determinada por la sección eficaz de dispersión de la onda acústica por parte de cada pez, observada desde la misma dirección de emisión de la misma. En la literatura anglosajona esta señal se conoce como *target strength (TS)*, definida como la razón en dB de la intensidad devuelta frente a la energía incidente sobre el pez. El *TS* no depende de la distancia pero si es característico de cada especie dependiendo también del ángulo de observación y de la frecuencia acústica de trabajo. La contribución al *TS* en la mayoría de los peces, es debida a la presencia de la vejiga natatoria, donde la presencia de la interfase agua-aire hace que se refleje mayor cantidad de energía. En el caso de las tortugas, la presencia de pulmones de gran tamaño hace prever que su *TS* sea mayor que el de la mayoría de peces que podamos encontrar

distribuidos en la columna de agua. La existencia del caparazón rígido, exclusivo de estos animales, también contribuirá al *TS* registrado, tanto en intensidad como en directividad. Sin embargo, y probablemente debido a la falta de interés comercial de la especie, a pesar de que las tortugas son buenos candidatos para ser estudiados con las herramientas propias de la acústica submarina, los estudios acústicos orientados a la detección y evaluación de tortugas marinas son muy limitados. En el único estudio realizado en las costas españolas no se obtuvo ninguna medida de tortuga viva (se utilizó una tortuga muerta, de *TS* mucho menor, como señuelo acústico) [10]. En un reciente estudio se limitan a estudiar la directividad cualitativa de la tortuga en cautividad, en condiciones donde la reverberación del tanque y el armazón de madera que sujeta la tortuga, con posibles consecuencias de estrés para el animal, no permiten obtener datos cuantitativos fiables [11]. Algunos estudios en Estados Unidos utilizaron un sónar de barrido lateral de 900 kHz para detectar la presencia de tortugas atrapadas en redes, con un dispositivo que permite barrer la columna de agua a una distancia relativamente corta del transductor (debido precisamente a la alta frecuencia, que proporciona imágenes con mucha precisión pero se atenúa más rápidamente con la distancia)[12], o a detectar tortugas que se encuentran en el lechos fluviales, situadas sobre el suelo [13].

En este trabajo se ha medido y caracterizado la respuesta acústica (*TS*) de una tortuga boba viva nadando en mar abierto por primera vez, utilizando un sónar de barrido lateral de 200 kHz. Para barrer la columna de agua donde nada la tortuga se ha modificado la posición habitual de funcionamiento del transductor.

Para analizar la contribución del caparazón, que es un elemento distintivo de las tortugas, se ha caracterizado el mismo desde el punto de vista acústico. Para estudiar su comportamiento acústico es necesario conocer su densidad [14] y la velocidad de propagación de sonido a través de él. Ante la falta de este dato en la bibliografía, en este trabajo se ha medido experimentalmente la velocidad de propagación del sonido en el caparazón de la tortuga *Caretta caretta* mediante la técnica del ecoimpulso. Este dato permite conocer las características acústicas del caparazón, y realizar simulaciones numéricas para comparar con las medidas experimentales. El *TS* del caparazón se ha medido experimentalmente en mar abierto, así como el *TS* de un buzo que puede ser comparado con el *TS* de la tortuga.

EL *TS* es el parámetro que permite identificar acústicamente la presencia de tortugas y si es distinguible del de otras especies, proporcionar una herramienta que en un futuro puede ser utilizada para la identificación y realización de censos de un modo más efectivo, fiable y económico que los procedimientos actuales. Por otro lado, el hecho de que las tortugas sean animales solitarios y no suelen nadar en grupo, facilita la detección de ecos de ejemplares individuales pues en el caso, por ejemplo, de los cardúmenes de peces, el enmascaramiento de

unos individuos por otros, dificulta el proceso. Si consideramos la posibilidad de aplicar la detección acústica para identificar y censar tortugas marinas, el hecho de que sean animales que suelen encontrarse aislados, permitirá distinguirlas también de otros animales que pueden proporcionar ecos con niveles parecidos pero que suelen presentarse en grupo y/o avistarse con facilidad (cetáceos).

2 Materiales y métodos

El proceso experimental de este proyecto está dividido en dos partes, en primer lugar será determinada la velocidad de propagación del sonido en el caparazón mediante la técnica del ecoimpulso y posteriormente se determinará la señal acústica que produce la tortuga boba mediante el uso de un sonar de barrido lateral para poder distinguirla de otras especies.

2.1 Cálculo de la velocidad de propagación del sonido en el caparazón mediante la técnica de ecoimpulso.

2.1.1 Descripción del método

Mediante la técnica de ecoimpulso se puede medir la velocidad de propagación longitudinal en un medio. Con la velocidad de propagación y la densidad, conocemos la impedancia acústica específica del medio, que determina las propiedades de reflexión y transmisión de las ondas acústicas en una interfase.

Las vibraciones ultrasónicas viajan en forma de ondas de forma similar a la luz. La diferencia recae en que el ultrasonido requiere de un medio elástico tal como un líquido o un sólido para propagarse. Las características del medio van a influir en la onda del sonido y, la velocidad de propagación va a depender de la densidad ρ y el coeficiente de compresión del medio k , de acuerdo con la ecuación (1).

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho \cdot k}} \quad (1)$$

Cuando una onda ultrasónica atraviesa un material, uno de los fenómenos que aparece es la reflexión de los haces ultrasónicos, denominados ecos. Una reflexión ocurre en el límite o interfase entre dos materiales, y pone de manifiesto la diferencia entre uno y otro (figura 6). Esta propiedad conocida como impedancia acústica específica Z , depende de la densidad y velocidad de propagación en cada medio según la ecuación (2).

$$Z = \rho \cdot c \quad (2)$$

Detección acústica de la tortuga boba (*Caretta caretta*) mediante técnicas activas

Si el contraste de impedancias es pequeño, se producirá un eco débil ya que la onda penetrará en el otro material. Por el contrario, si la diferencia entre las impedancias es mayor (agua-aire), el haz ultrasónico sufrirá una mayor reflexión.

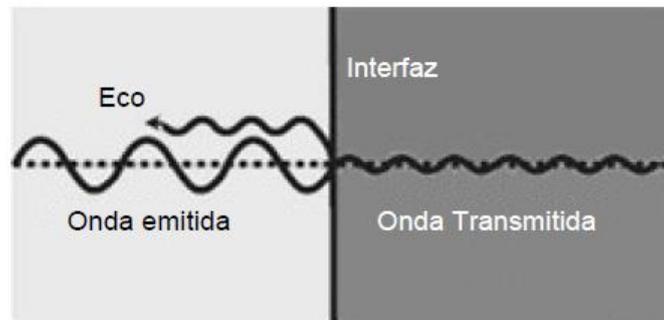


Figura 6. Interfaz acústica.

La técnica del ecoimpulso, consiste en generar pulsos ultrasónicos mediante un transductor encargado de transformar energía eléctrica en mecánica (onda) denominada *ping* que viajarán a través del material hasta la interfaz, donde se producirá la reflexión, generando el eco que será detectado por el transductor que reconvierte el impulso mecánico en una señal eléctrica, la cual visualizaremos en la pantalla del osciloscopio digital [15].

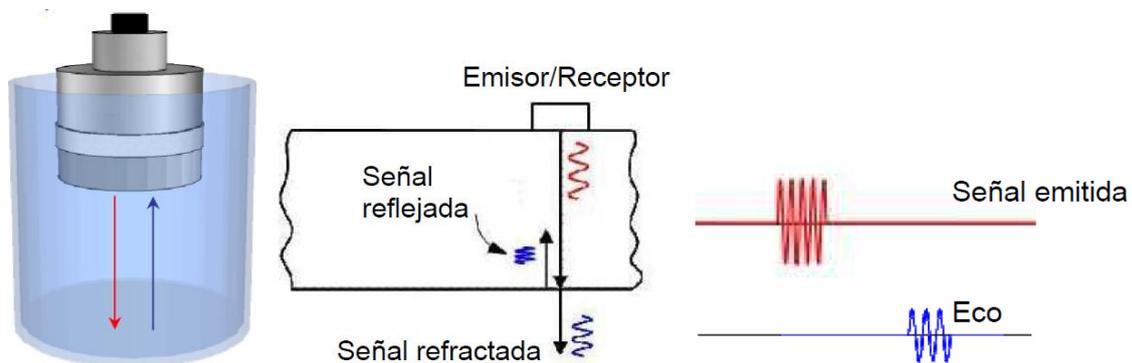


Figura 7. Proceso de emisión recepción del pulso-eco ultrasónico.

Parte del eco, se vuelve a reflejar en el transductor, por lo que se vuelve a transmitir por el material para ser de nuevo detectado después de su reflexión en la interfaz. A esta nueva señal se denomina como segundo eco.

Registrando los tiempos en los que recaen los máximos de intensidad del primer y segundo eco, se obtiene el intervalo temporal para el cálculo de la velocidad mediante la ecuación (3).

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3)$$

La distancia recorrida por el ultrasonido es dos veces el grosor del caparazón pues realiza el camino de ida y vuelta.

En este caso se caracteriza por vez primera la velocidad de propagación del sonido en el caparazón utilizando la técnica de ecoimpulso.

2.1.2 Procedimiento experimental

Instrumentación:

- Caparazón de ejemplar juvenil de tortuga boba (56 cm de largo, 44 cm ancho)
- Recipiente de metacrilato 41,5cm x 41,5cm x 20,5cm
- Transductor piezoeléctrico OLYMPUS, 7,5 MHz
- Generador de impulsos OLYMPUS 5072PR
- Osciloscopio Tektronix TDS 2024B
- Calibre o pie de rey - precisión:0,001 m
- Ordenador
- Software Tektronix

Las medidas se han tomado sobre un caparazón de un ejemplar juvenil de tortuga boba cedido por el ARCA (centro de recuperación de tortugas marinas propiedad de la Generalitat Valenciana en colaboración con l'Océanografic) para la realización de este proyecto.

En una primera fase se diseñó el dispositivo experimental y se seleccionó el transductor que se debía utilizar. Para facilitar por un lado, la transmisión de los ultrasonidos, y por otro, para hidratar el caparazón, como se encuentra en estado natural, el experimento se realizó con el caparazón sumergido en agua. En la selección del transductor, resulta crítico el grosor del caparazón. La duración del pulso emitido (ver Fig.7) debe ser lo suficientemente breve para que el principio del eco no se superponga a la cola del pulso emitido y pueda distinguirse el pulso original del eco. Dado que la duración del pulso es inversamente proporcional a la frecuencia, esta limitación determinó la elección de un transductor de alta frecuencia.

Después de dividir el caparazón e identificar diferentes regiones, aprovechando una fisura donde se ha podido determinar con una precisión de 0,05 mm el grosor de éste, se ha procedido a obtener mediante el ecoimpulso, diferentes medidas de intensidad de los ecos.



Figura 8. Caparazón con las regiones identificadas y sumergido en agua.



Figura 9. Transductor de 7,5 MHz sobre el caparazón durante la toma de medidas experimentales.

Ya con el caparazón sumergido en agua dentro de un recipiente de metacrilato (Fig. 8), colocando el transductor con cuidado para asegurar el máximo contacto con éste en la zona fracturada, para evitar por completo burbujas de aire que pudiesen interferir en la señal, se ha procedido a la visualización de los ecos en la pantalla del osciloscopio (Fig. 20).

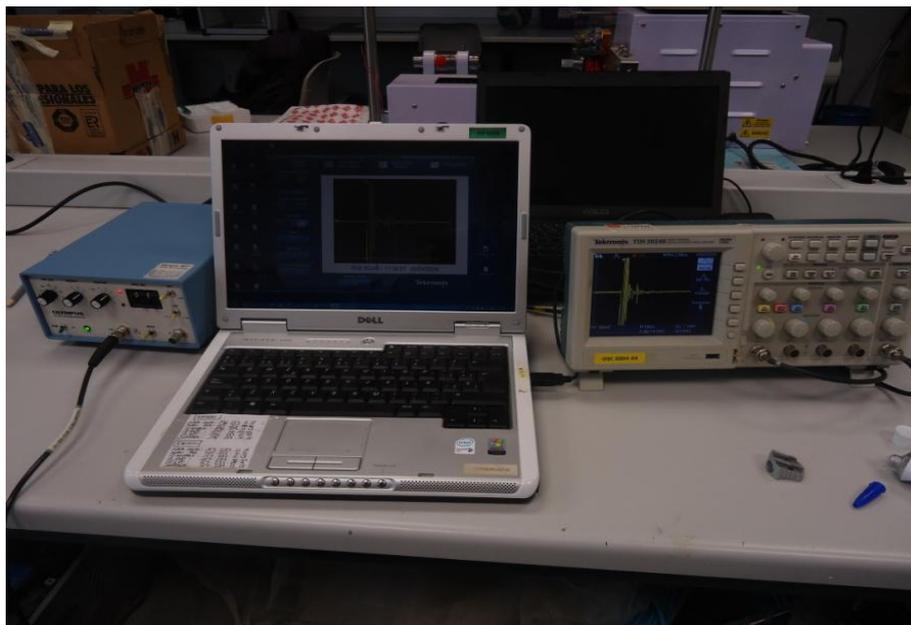


Figura 10. Generador de señal (izq.), ordenador (centro), osciloscopio (dcha.).

Se han identificado los máximos de tensión (mV) del primer y segundo eco, anotando el tiempo (μs) sobre el que recaían. Se calcula el intervalo temporal referido al tiempo que una onda tarda en ir y volver hasta el transductor, después de atravesar el caparazón y ser reflejada. Se utilizan los resultados de distintas medidas para calcular la recta de regresión que proporciona la velocidad de propagación como se mostrará en el apartado 3.1.

2.2 Medida de la respuesta acústica de la tortuga boba mediante el uso de un sónar de barrido lateral.

2.2.1 Descripción del método

El sónar de barrido lateral es un instrumento acústico diseñado principalmente para la detección de objetos en el fondo aunque actualmente ha sido aplicado además en estudios de texturas de fondo y cartografía de vegetación submarina. Se basa en el mismo principio que la técnica del ecoimpulso. Un haz acústico con poca apertura longitudinal y gran apertura transversal generado por un transductor de alta frecuencia en este caso, en las capas superficiales del agua, es enviado hacia el fondo donde parte se refleja para ser nuevamente detectado y transformado en una señal eléctrica por el transductor (Fig. 11) [16].

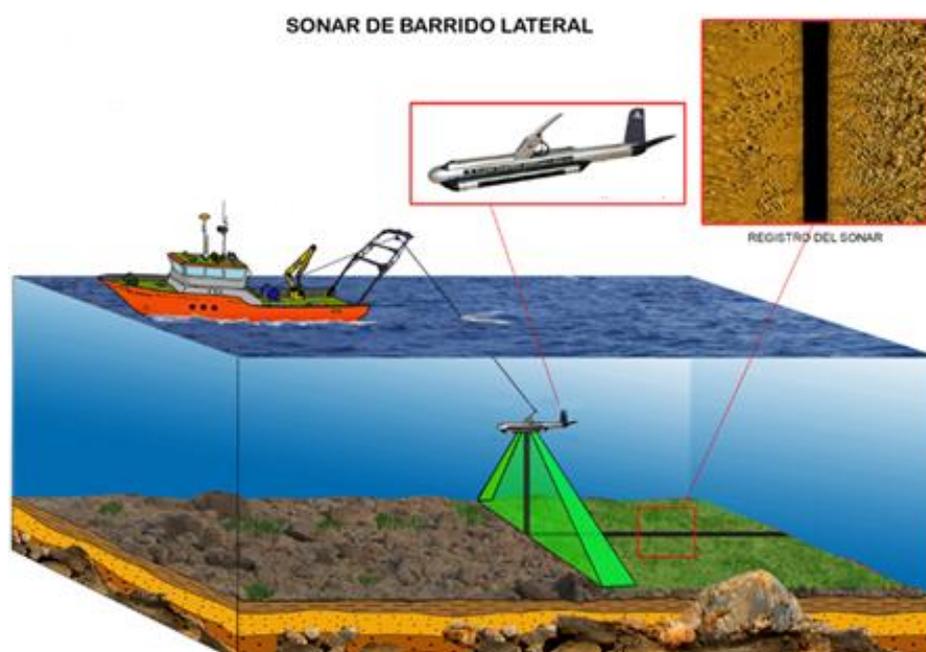


Figura 11. Esquema sónar barrido lateral (montaje habitual para detección de objetos obre fondos).

En nuestro caso la configuración habitual del sónar de barrido lateral se modifica para detectar las tortugas que se encuentran en la columna de agua. Las tortugas, aunque realizan inmersiones que pueden durar horas, pasan gran parte del tiempo nadando cerca de la superficie por lo que el transductor se sitúa en la posición adecuada para barrer una zona extensa cerca de la superficie del mar (Fig.12).

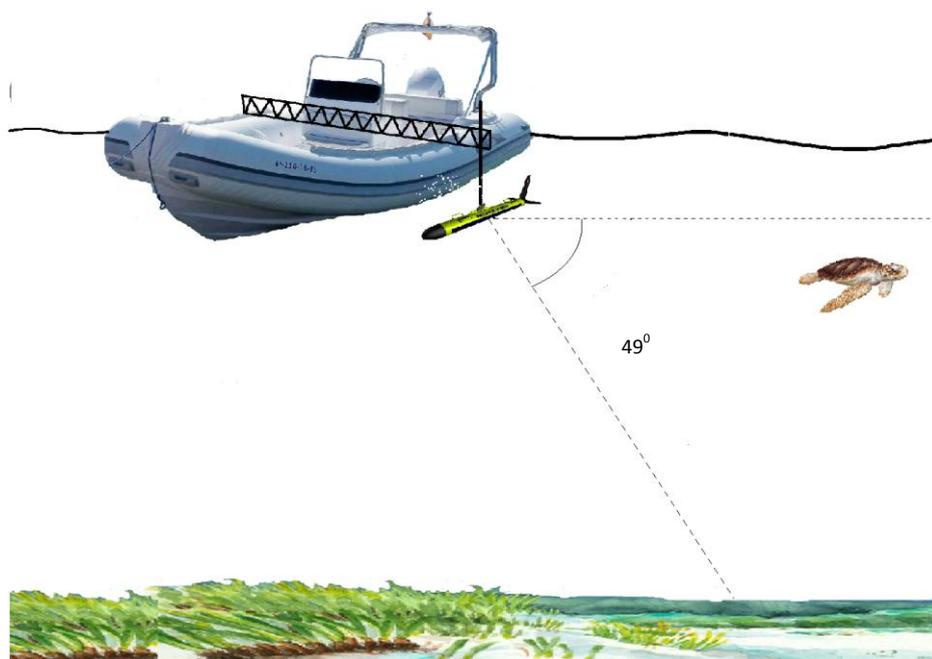


Figura 12. Esquema del montaje vertical de la ecosonda propuesto para la detección de tortugas marinas.

Si en la trayectoria descrita, la onda se encuentra con un obstáculo, entendiendo como tal un objeto de propiedades diferentes, parte del ultrasonido será reflejado debido al contraste de impedancias.

Los pulsos acústicos (*pings*), en su propagación en el océano, a menudo "colisionan" con obstáculos ya sea en la columna de agua en sí (peces, plancton, burbujas) como en los límites del medio (superficie o lecho marino). Estos obstáculos actúan como dispersores de la onda incidente, y parte de esta onda dispersada es enviada de vuelta hacia el sistema sónar/ecosonda (ecos del objeto), detectados por el transductor. Estos ecos tanto pueden ser deseables como indeseables, siendo en ambos casos necesario para la comprensión de los datos, el buen funcionamiento del sónar, ya que los ecos es necesario recibirlos en las mejores condiciones ya que se necesita filtrarlos y reducirlos lo mejor posible.

El comportamiento de una onda acústica emitida por un sistema sónar/ecosonda propagándose en el medio es descrito por la ecuación del sónar, ecuación (4), una suma de intensidades en escala logarítmica que resume las expresiones de las que depende la emisión y recepción de una onda acústica [1].

$$EL = SL - 2TL + TS \quad (4)$$

EL; es el nivel de energía recibida por el transductor, *eco level*.

SL ; es el nivel energético de la fuente de sonido, *source level*.

TL ; es la corrección que se aplica por las pérdidas de propagación de la onda hacia el transductor receptor, incluyendo las pérdidas por atenuación geométrica (*spreading* en la literatura anglosajona).

spreading: intensidad en un punto del frente de onda situado a una distancia r_i del punto de origen r_o .

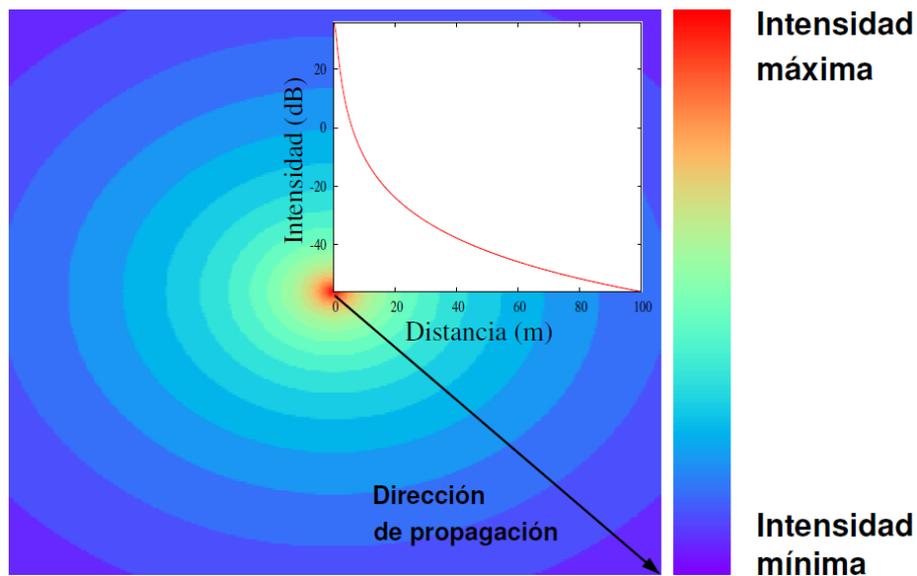


Figura 13. Atenuación de la intensidad de una onda esférica a medida que se aleja de su fuente. *spreading*.

La propagación del sonido lleva siempre implícita una atenuación de la onda, es decir, una disminución en la energía del paquete de onda en el transcurso de su propagación, que se manifiesta en una transferencia de calor. Esta atenuación es debida principalmente a dos mecanismos; disipación viscosa y relajación química.

- *disipación viscosa*: pérdida de energía que sucede cuando las partículas de un fluido se mueven respecto a sus vecinas. Es proporcional a la frecuencia, es decir, las frecuencias altas provocan que las partículas se muevan más rápido, incrementando la fricción entre ellas, por lo que la pérdida de energía será también mayor (este hecho limita el rango espacial de aplicación de dispositivos de muy alta frecuencia).

- *relajación química*: pérdida del equilibrio químico de algunas moléculas cuando son perturbadas por una onda de presión. No es igual para todas ya que cada una posee una frecuencia crítica por debajo de la cual se produce la relajación química y con ella la absorción de energía [17].

De este modo, en su avance por la columna de agua, la onda sufre una pérdida progresiva de energía hasta que la intensidad de su frente de onda es indistinguible del ruido de fondo.

El último término de la ecuación del sónar, ecuación (4), es el *TS*, **target strength**, que define la fuerza con la que una onda es reflejada en un área determinada. Depende de la superficie donde se produce la reflexión y se define mediante la ecuación (5).

$$TS = 10 \log \left(\frac{I_{bs}}{I_i} \right) \quad (5)$$

I_i : intensidad de la onda incidente

I_{bs} : intensidad de la onda reflejada (*backscattered*: dispersión de la onda acústica de retorno)

El *TS* no depende de la distancia a la que se encuentre el objeto, si no de la naturaleza física, de su estructura externa (y posiblemente de la interna) y de las características de la señal incidente, tanto del ángulo de observación como de la frecuencia acústica de trabajo.

En los peces, la mayor contribución al *TS* suele venir dada por parte de la vejiga natatoria, ya que es en la interfase agua-aire donde se refleja gran cantidad de energía debido al contraste de impedancias.

Debido al tamaño de los pulmones, en el caso de las tortugas es de esperar que el *TS* sea notablemente mayor que el de otras especies marinas, con unas dimensiones y geometrías características. Por otro lado, la existencia del caparazón, que es un elemento característico únicamente de estos animales, es de esperar que contribuya al valor cuantitativo del *TS*. Por último, el hecho particular de que las tortugas sean animales solitarios, facilita por un lado su identificación como ecos individuales (lo que no ocurre en especies que nadan en bancos donde el apantallamiento dificulta en conteo de individuos), y que sean distinguibles de los animales que debido a su tamaño y pulmones, pudieran presentar un *TS* similar (mamíferos marinos).

2.2.2 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental constó de dos etapas: una primera fase de preparación en la que se diseñó y montó el dispositivo de medida y una segunda fase en la que se han realizado mediciones ejemplares vivos de tortuga boba durante la suelta de ejemplares recuperados del ARCA. En la primera fase se han realizado inmersiones para caracterizar el *TS* proporcionado únicamente por el caparazón y el proporcionado por un buzo. En la segunda se ha realizado la medida real del *TS* proporcionado por una tortuga viva nadando en mar abierto.

Instrumentación

- Ecosonda SIMRAD EA400
- Transductor de barrido lateral 200k con 5° de apertura longitudinal y 49° apertura transversal
- Lancha neumática
- Ordenador
- Ejemplar vivo de tortuga boba
- Software SONAR5 PRO
- Equipo ligero de buceo

2.2.2.1 Fase de preparación

Sobre una embarcación neumática dotada con un soporte de acero inoxidable, se coloca el sistema sonda de barrido lateral, consistente en una ecosonda Simrad EA400 conectada a un transductor con un ángulo transversal de 49° y una apertura longitudinal de 0,5° a -3dB al cual se le modifica la configuración habitual, para disponerlo orientado sobre la vertical de forma que cubra la columna de agua, ya que es la zona con mayor probabilidad de detectar a las tortugas marinas.



Figura 14. Proceso de montaje de la ecosonda en la embarcación.

Durante el proceso de preparación, se realizaron inmersiones para obtener diferentes medidas del *TS* correspondiente al caparazón sumergido en mar abierto, así como para caracterizar el *TS* del buzo medido con la ecosonda y el transductor elegidos para la medida de la tortuga. El *TS* del caparazón proporciona un umbral mínimo para la detección de las tortugas, cuyo *TS* tendrá, además de la propia contribución del caparazón, la contribución de la carne, los huesos y fundamentalmente, el aire de los pulmones.

En este proceso se realizan varias inmersiones pasando por delante del transductor colocado en la embarcación fondeada.

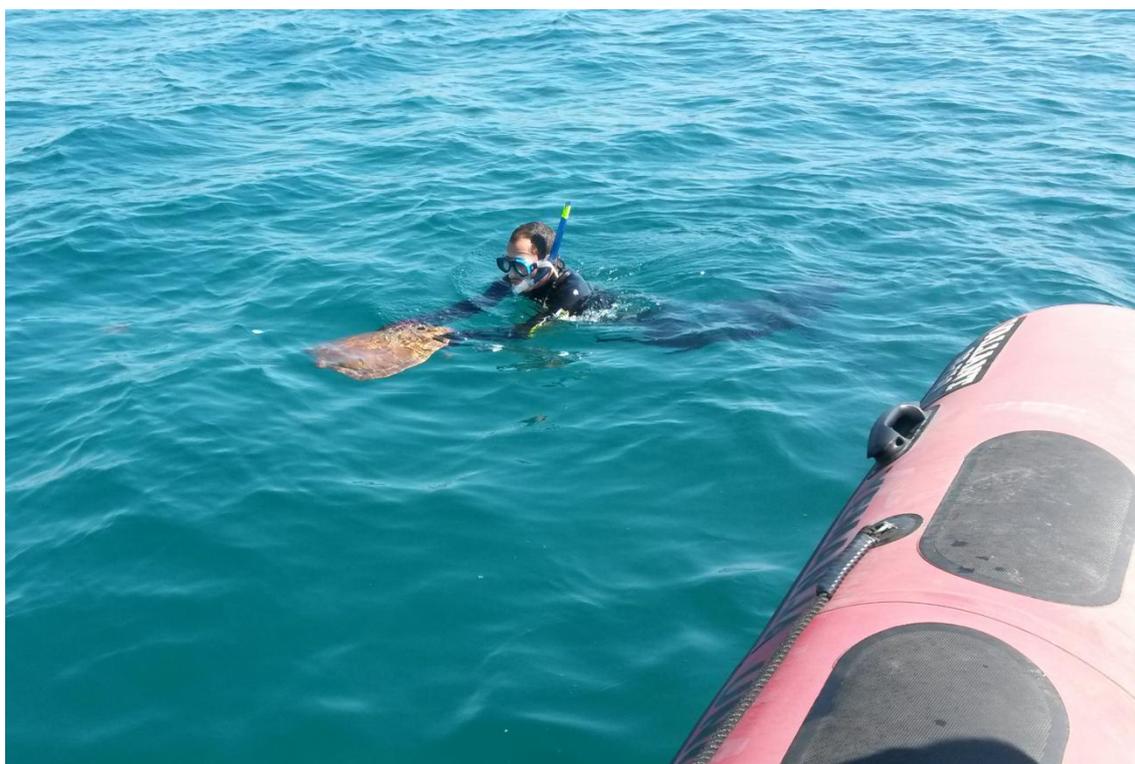


Figura 15. Buzo en superficie sujetando el caparazón.

Se toman medidas tanto del buzo sólo, del buzo sosteniendo el caparazón con las manos y de éste arrastrando tras de sí el caparazón. En este último caso se le coloca al caparazón un sedal de pesca de 1,5m de longitud por el que se tira para pasarlo frente al transductor, ya que el sedal no proporciona señal medible y no falseará los resultados.

Las medidas se realizan a diferentes profundidades y distancias de la embarcación.

2.2.3.2 Obtención de medidas experimentales

Repitiendo el montaje aplicado durante la fase de preparación, las medidas experimentales con animales vivos se realizaron durante dos jornadas aprovechando las sueltas de tortugas recuperadas en acuerdos con la Generalitat-Oceanogràfic. La primera de ellas se realizó el 2 de

Detección acústica de la tortuga boba (*Caretta caretta*) mediante técnicas activas

mayo de 2014 en el puerto de Denia (Alicante) y el 19 de Junio 2014 en Poble de Farnals (Valencia).



Figura 16. Imágenes correspondientes a las suelta de las tortugas recuperadas.

La embarcación de investigación desde la que se realizan las medidas se sitúa a unos 10 metros de la embarcación que realiza la suelta. De este modo se intenta no influir en el comportamiento del animal y fundamentalmente mantener una distancia de seguridad que garantice en todo momento su bienestar. Gracias a la colaboración de buzos y el propio avistamiento directo desde la barca, se sigue el rumbo de las tortugas, realizando barridos paralelos a su trayectoria para poder obtener señales acústicas que las detecten. El comportamiento de las tortugas en el momento de la suelta, que es lógicamente impredecible, es determinante para el éxito de las mediciones.



Figura 17. Equipo de investigadores siguiendo el rumbo de la tortuga durante el avistamiento y obteniendo su señal.

Los resultados obtenidos han sido procesados utilizando tanto el software propio de la ecosonda proporcionado por Simrad, como con Sonar Pro, software propiedad de Limdem Data Acquisition para la interpretación y manipulación de ecogramas. Este programa ha abordado recientemente la problemática de la clasificación de fondos mediante el uso algoritmos, y que ha sido utilizado en este caso para la detección e identificación de las señales procedentes de los "objetos" de interés.

Hay que tener en cuenta que la directividad, tanto del haz incidente como del objeto en el que incide, van a variar el valor de la respuesta acústica, por lo que para determinar el TS de un objeto es necesario realizar el tratamiento estadístico de los datos.

3 Resultados

3.1 Cálculo de la velocidad de propagación del sonido en el caparazón de la tortuga boba.

Inicialmente, se dividió el caparazón en distintas regiones (Fig. 18) a fin de estudiar la forma de los ecos procedentes de distintas zonas del caparazón, y de este modo determinar qué zona podría determinar una medida más precisa de la velocidad de propagación en el material.

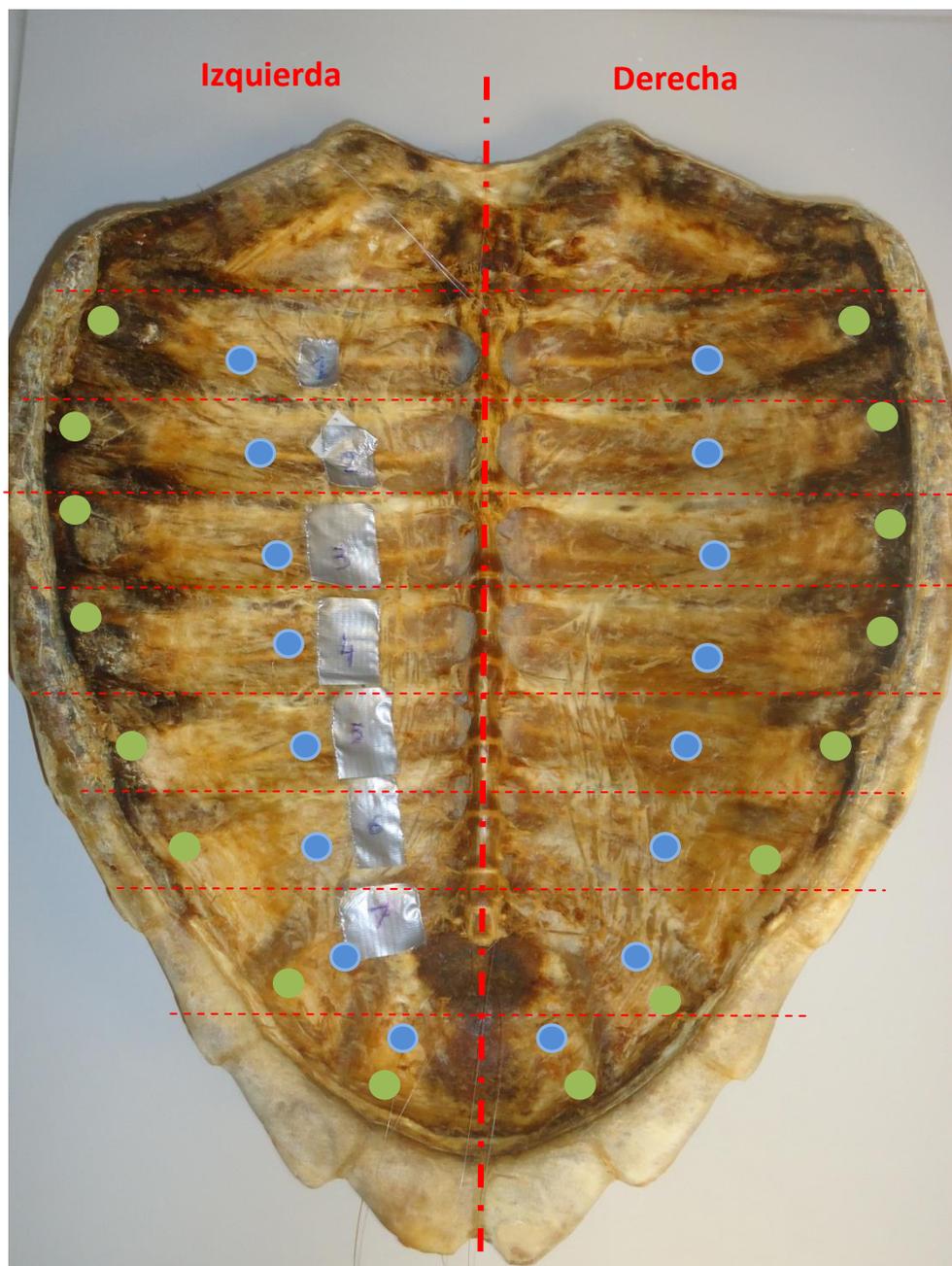


Figura 18. Diferentes secciones establecidas en el caparazón. La zona elegida para realizar las medidas finalmente fue en la región entre las marcas azules y verdes, obteniendo resultados similares en ambos costados.

Finalmente se decidió realizar las medidas en la tercera región del costillar aprovechando la existencia de una fisura (Fig. 19). De este modo se pudo determinar el grosor del caparazón con los medios existentes en el laboratorio y no fue necesario realizar una inversión en otros tipo de aparatos de medida. Por supuesto, el caparazón ha sido tratado con cuidado para evitar cualquier tipo de degradación, por lo tanto, el espesor en la zona fracturada se ha medido mediante un calibre con precisión de 0,05 mm, introduciendo la aguja para medidas en profundidad en la fisura. El error en la medida del tiempo de vuelo depende de la escala de tiempos elegida en el osciloscopio, para el caso de las medidas de la Tabla 1, el error es de 0,1 μ s.

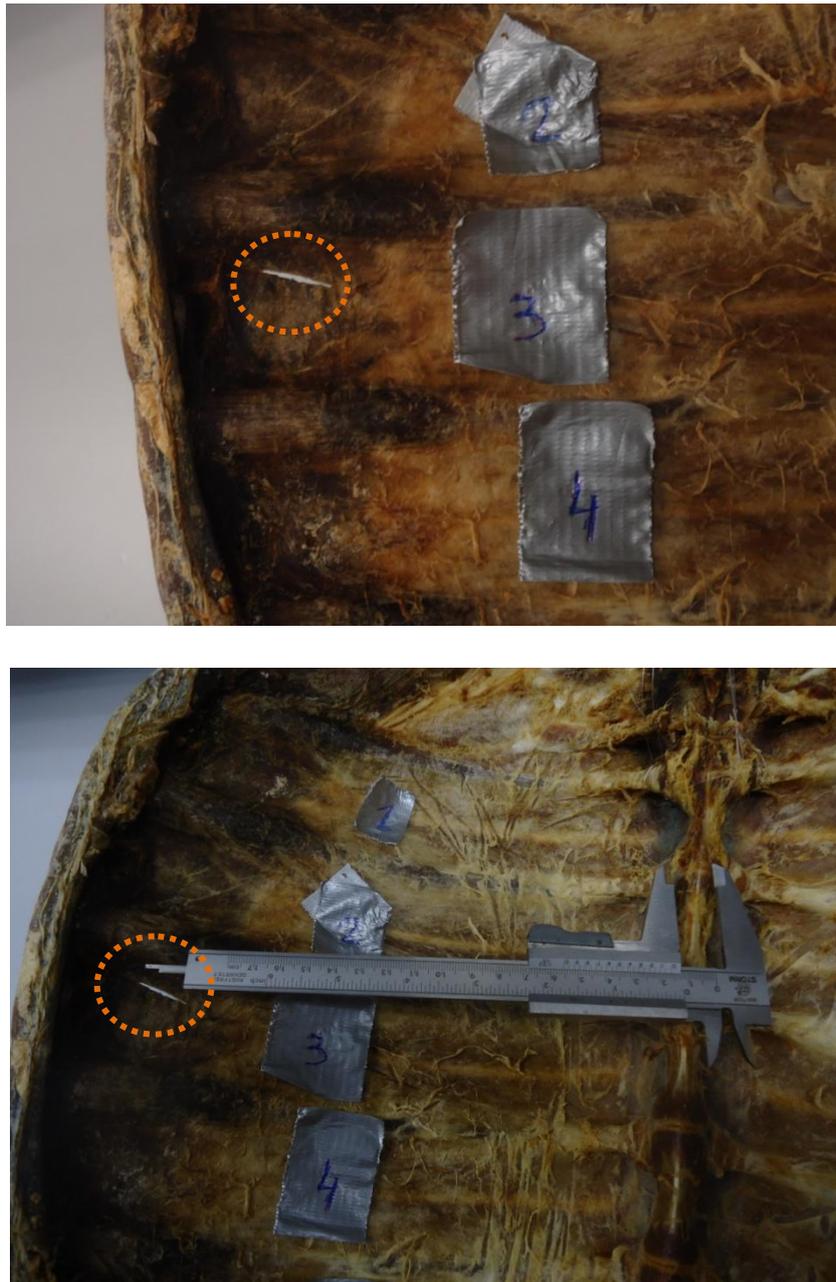


Figura 19. Fisura en la región 3 del costillar izquierdo donde se ha podido determinar el grosor del caparazón con una precisión de 0,05 mm.

En la figura 20, se muestra una de las medidas en la pantalla del osciloscopio, siendo evidentes el primer y segundo eco. Para determinar la velocidad se han tomado distintas medidas del grosor y del tiempo de vuelo invertido y se ha calculado la velocidad de propagación a partir de la recta de regresión a la que se ajustan las medidas. En la gráfica 1, se representa dicha recta.

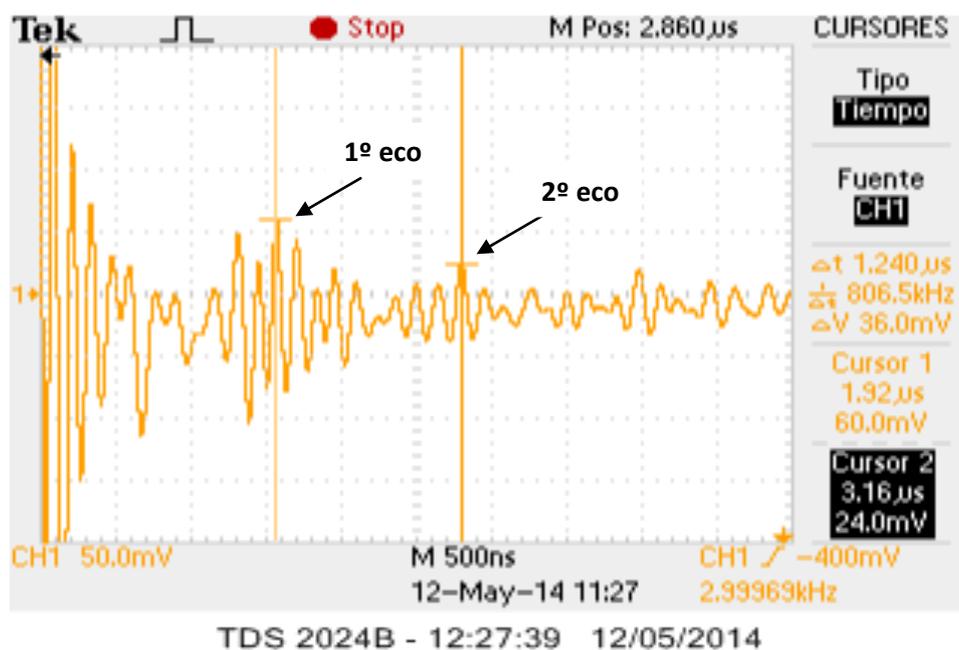
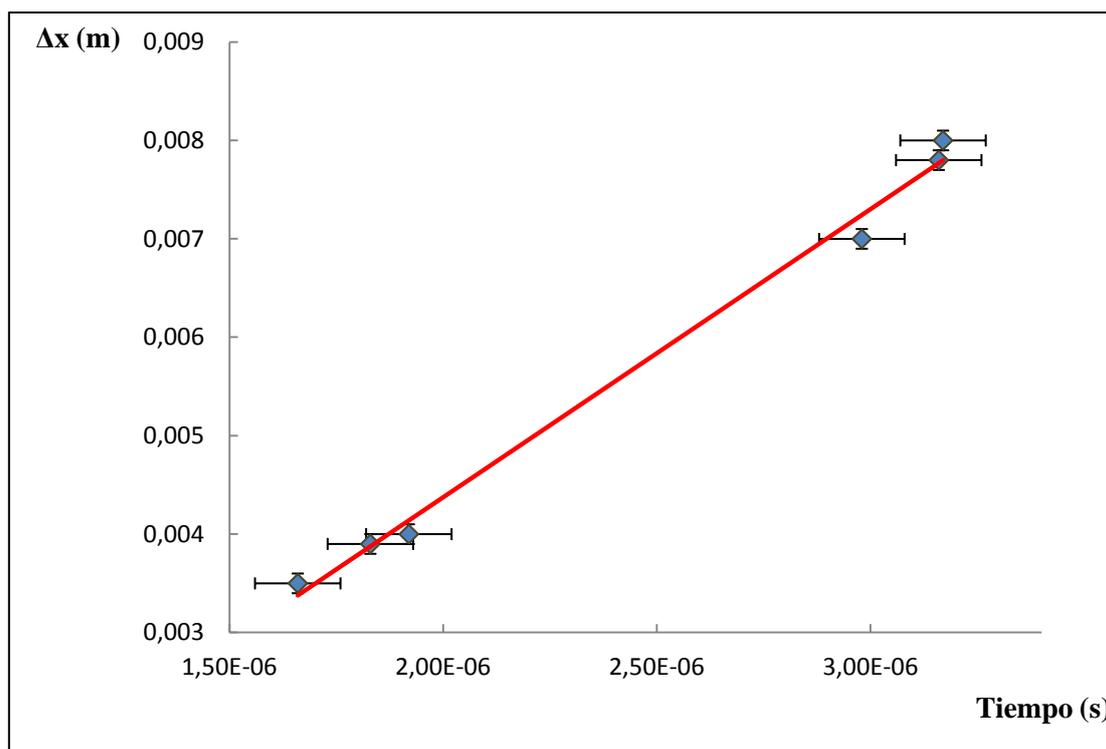


Figura 20. Pantalla del osciloscopio donde se pueden identificar el primer y segundo eco de la onda tras su reflexión para el registro del tiempo a los que caen.

En la gráfica 1, se representan los tiempos pertenecientes a los respectivos ecos frente a la distancia recorrida en su propagación para la determinación de la velocidad.

Reflexión	Δx (m)	t (s)
1º eco	0,0035	1,83E-06
	0,0039	1,66E-06
	0,004	1,92E-06
2º eco	0,007	3,17E-06
	0,0078	2,98E-06
	0,008	3,16E-06

Tabla 1: distancia recorrida por los pulsos (Δx) y tiempo referido a cada eco (t).



Gráfica 1. Recta de regresión para la obtención de la velocidad de propagación.

La ecuación de la recta cuya pendiente proporciona la velocidad de propagación del sonido en el caparazón se define como:

$$\Delta x = 2930 t - 0,0015 (m)$$

$$R^2 = 0,994$$

El coeficiente de correlación viene dado por el valor $R^2=0.994$. Se ha calculado tanto el error de la pendiente $\varepsilon(c)= 110$ m/s como el error de la ordenada en el origen $\varepsilon(b)= 0.0003$ m.

Podemos concluir, por lo tanto que, **la velocidad de propagación del sonido en el caparazón es: $C = 2930 \pm 110$ m/s**. Esta es la primera caracterización acústica del caparazón de la tortuga *Caretta caretta*. Teniendo en cuenta que el caparazón está formado en su mayor parte por hueso y en una parte menor por material viscoelástico [14], el resultado obtenido es coherente (ver apartado 5. Discusión de los resultados).

Esta medida, además de proporcionar nueva información acerca de las propiedades del caparazón de la tortuga y de su composición, proporciona una información necesaria para estudiar numéricamente el comportamiento de la tortuga como dispersor acústico, y poder realizar simulaciones numéricas como la que se muestra en la Información adicional que sean comparables con las medidas in situ.

3.2 Medida de la respuesta acústica de la tortuga boba mediante sónar de barrido lateral.

En primer lugar, en la primera parte del proceso o fase de preparación, se ha instalado el equipo en la embarcación y se ha salido al mar para realizar inmersiones de buceo que permitan identificar la respuesta acústica del caparazón.

Una vez fondeada la embarcación a 10 metros de la costa, se tomaron medidas en diferentes situaciones. La zona donde se realizó esta fase del estudio está situada frente a las costas de la localidad de Gandía, en el litoral valenciano. El fondo de la zona de estudio consistía en arena fina, en ausencia de rocas o vegetación.

En primer lugar, se realizaron medidas para obtener el *TS* correspondiente a un buzo. Para ello, se realizaron varias pasadas frente al transductor, pasando a diferentes distancias y profundidades previamente establecidas. La figura 22 muestra el ecograma correspondiente al buzo pasando a una distancia aproximada de 3 metros del transductor. Las medidas de *TS* correspondiente al buzo, obtenidas en distintas inmersiones para profundidades entre 1 y 6 metros y distancias entre 2 y 6 metros se muestran en el Gráfico 1 de la Información Adicional. El valor promedio obtenido para la respuesta acústica del buzo es de -50.3 dB. La distribución de valores del *TS* es una distribución bimodal correspondiente a la forma del buzo: Se puede distinguir el eco que proviene de la zona de los pulmones rodeados por la caja torácica con un mayor *TS* frente a la señal correspondiente a piernas y aletas, con un *TS* menor. En la Fig. 22, se puede observar también este fenómeno, la primera señal registrada correspondiente al tronco del buceador tiene niveles de mayor intensidad que la cola del pulso, correspondiente al paso de piernas y aletas.. El rango de profundidades viene determinado por la zona en la que se realizan las sueltas de tortugas por parte del centro de recuperación. Este rango de profundidades limita la distancia de detección de la tortuga, aunque ésta aumenta si se realizan las mediciones en zonas de mayor calado, ya que no viene derivado de ninguna limitación por parte del método.

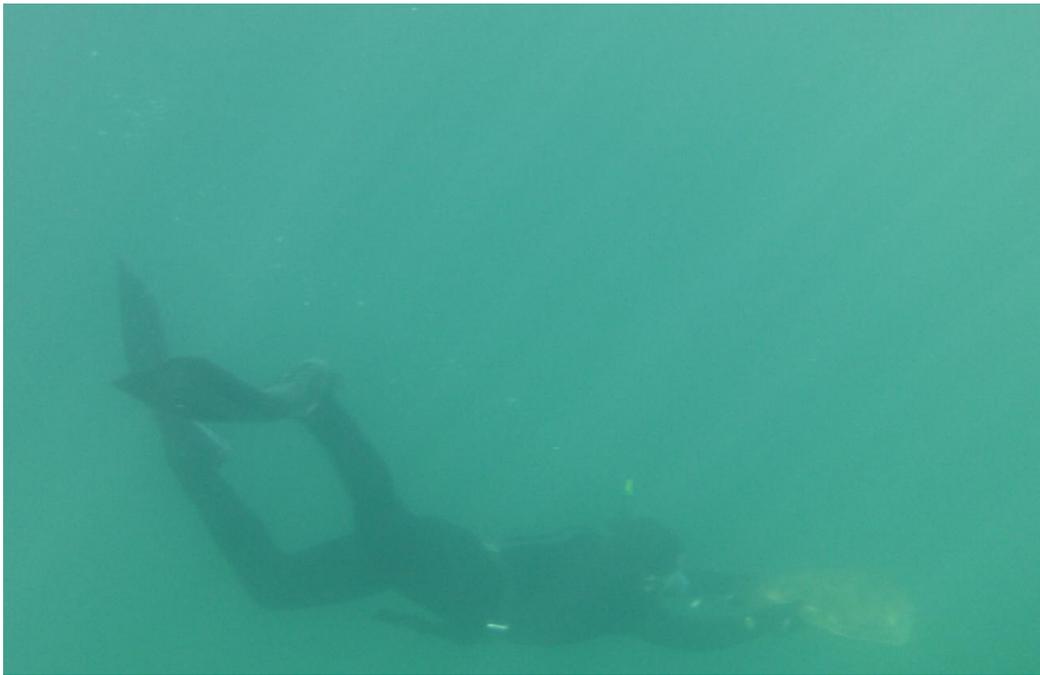


Figura 21. Buzo pasando frente al transductor.

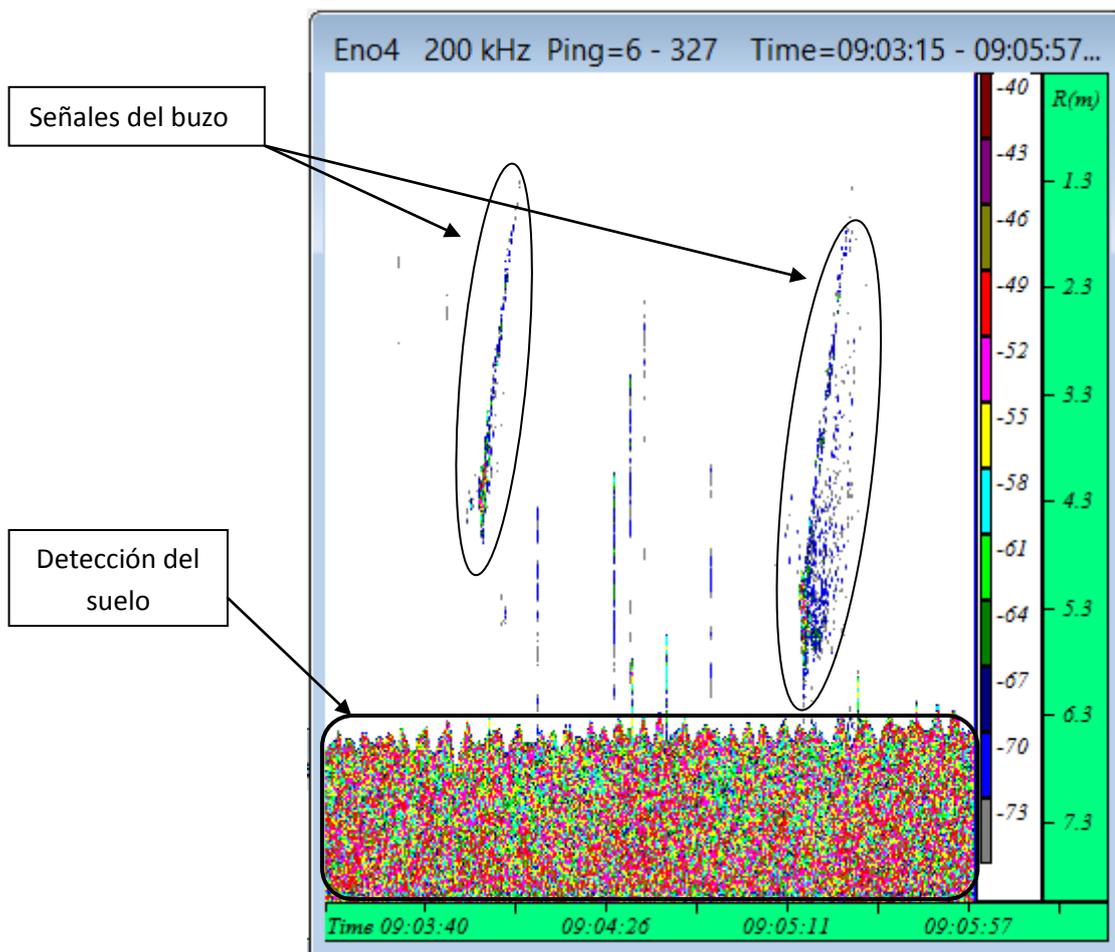


Figura 22. Ecograma a partir de las diferentes pasadas del buzo frente al transductor.

Detección acústica de la tortuga boba (*Caretta caretta*) mediante técnicas activas

En último lugar, en esta fase de preparación, se acopló un sedal de pesca de 1,5m en la parte frontal del caparazón por el que era arrastrado por el buzo para pasarlo por el haz emitido por el transductor y obtener la señal individual del caparazón. De esta manera, se pudo obtener la contribución de éste y se ha podido establecer un umbral mínimo de detección para la tortuga. La señal mínima de la tortuga sería la correspondiente a su caparazón: la carne de las tortugas es fundamentalmente agua, por lo que el contraste de impedancias con el medio acuático es muy pequeño y apenas proporciona señal, la mayor contribución al *TS* proviene de la existencia de aire en los pulmones, los cuales tienen un volumen variable [18]. En el caso límite y no habitual de los pulmones vacíos, la contribución al *TS* de la tortuga provendría fundamentalmente del caparazón por lo que éste nos proporciona un umbral de detección. Las pasadas en este caso, se realizaron en las mismas circunstancias que las anteriores, es decir, a las mismas distancias y profundidades. En el caso de las medidas de la respuesta del caparazón, la distribución del *TS* se adjunta también en la sección de Información adicional, con un *TS* promedio de -56.5 dB..



Figura 23. Caparazón arrastrado por el buzo

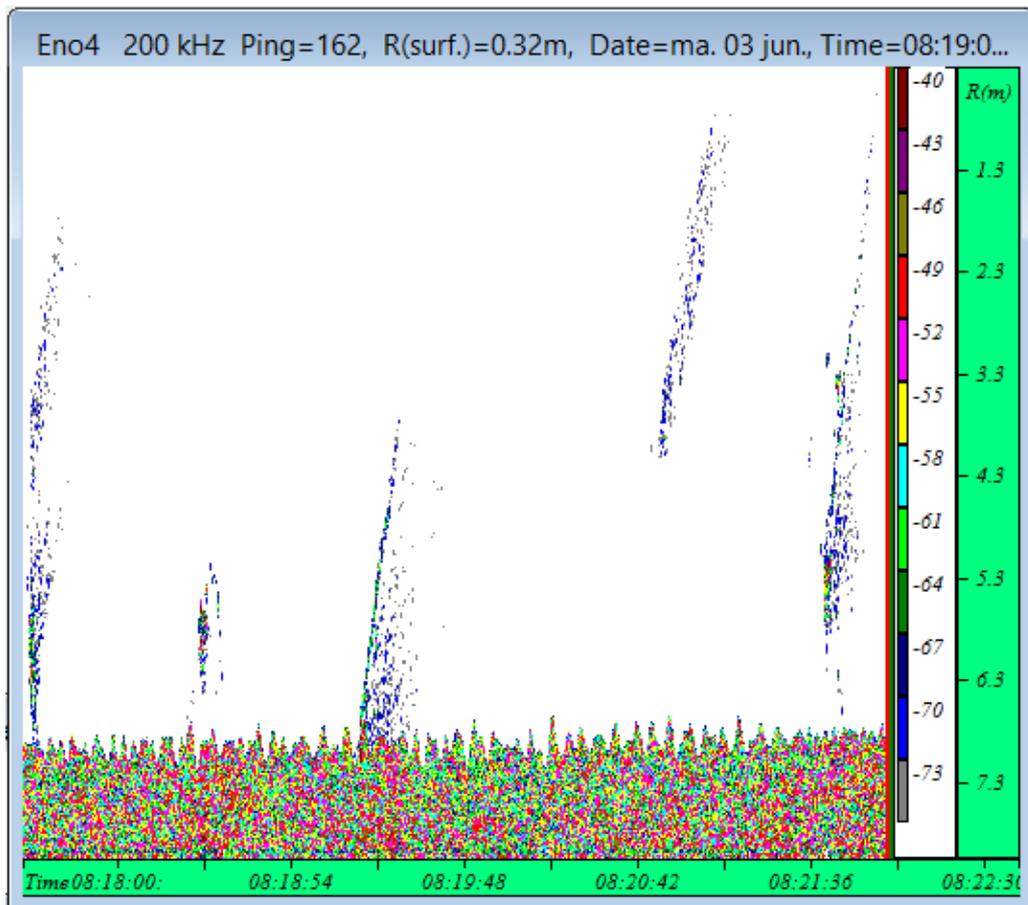


Figura 24. Ecograma obtenido con el buzo arrastrando el caparazón frente al transductor.

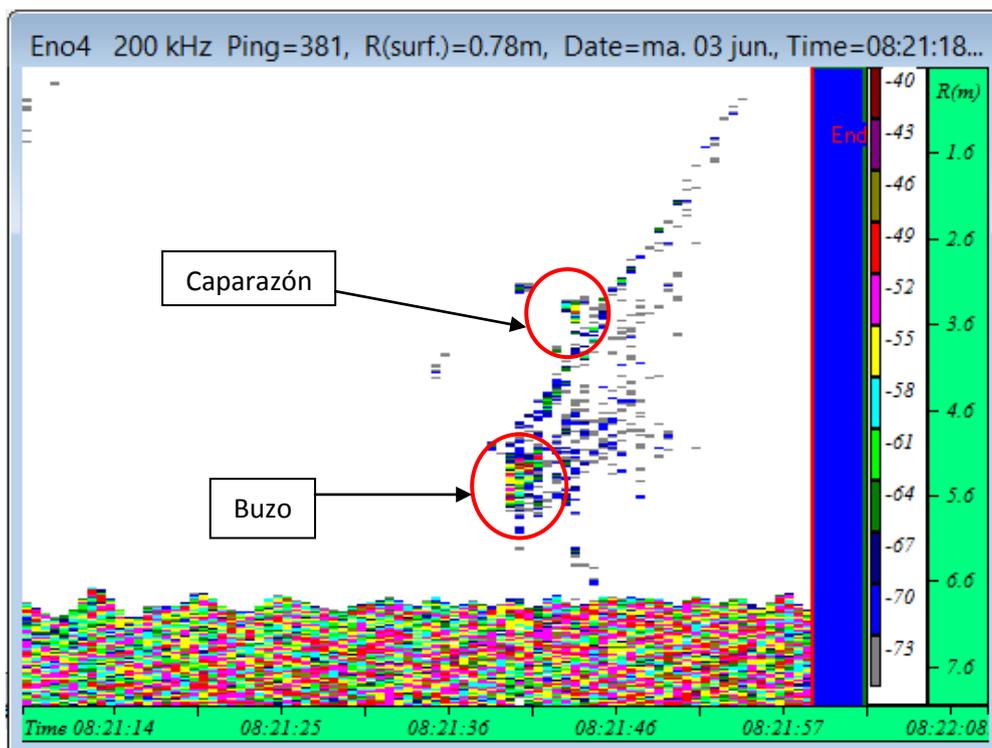


Figura 25. Zoom realizado sobre la imagen 23. Visualización de las señales correspondientes al buzo y al caparazón durante una pasada frente al transductor.

Detección acústica de la tortuga boba (*Caretta caretta*) mediante técnicas activas

La parte más novedosa y con un mayor impacto de este trabajo, ha consistido en la medida de la respuesta de una tortuga en libertad nadando en mar abierto. Durante los eventos en el que se han liberado tortugas rehabilitadas para una larga vida en el mar, además de tener el privilegio de asistir a un hermoso espectáculo, hemos podido realizar la última parte de este trabajo con la obtención de las señales de una tortuga viva con el sónar.

En la primera suelta, con el equipo montado sobre la embarcación y haciendo mención del imprevisible comportamiento y consecuente rumbo que una tortuga establece una vez liberada, a pesar de la presencia de buzos y sus indicaciones que marcaban la dirección tomada por los animales, de los 3 individuos que se soltaron durante esa misma mañana sólo pudimos detectar uno. Los dos primeros, eran juveniles que una vez puestas en libertad, su reacción fue dirigirse rápidamente hacia el fondo marino, siendo imposible su detección. La última tortuga, un ejemplar juvenil de mayor tamaño, (70 cm desde la cabeza a la cola), jugando a nuestro favor, se mantuvo nadando cerca de la superficie durante unos minutos, pudiendo ser detectada exitosamente con el dispositivo acústico.



Figura 26. Fotografías de la tortuga boba realizadas desde la embarcación científica.

Hay que mencionar, que en todo momento se ha velado por la seguridad de los animales, manteniendo siempre la distancia de seguridad evitando una posible colisión con el animal y evitando interferir en su comportamiento.

Una vez en el laboratorio, los datos han sido tratados y procesados con el programa SONAR5 PRO. Para la detección de la señal obtenida de la tortuga en el ecograma (Fig. 27), se apuntó la hora exacta del barrido, siendo las 12:22 pm. La tortuga dirigió su trayectoria hacia la embarcación científica en la que nos encontrábamos presentando un aspecto frontal hacia el transductor. En la siguiente figura se muestra el ecograma correspondiente a dicho evento. En el recuadro se ha marcado la detección de la tortuga número 3.

Detección acústica de la tortuga boba (*Caretta caretta*) mediante técnicas activas

En la Información adicional se ha adjuntado también la distribución del *TS* de la medida de la tortuga, mostrando un valor promedio de -49.3dB.

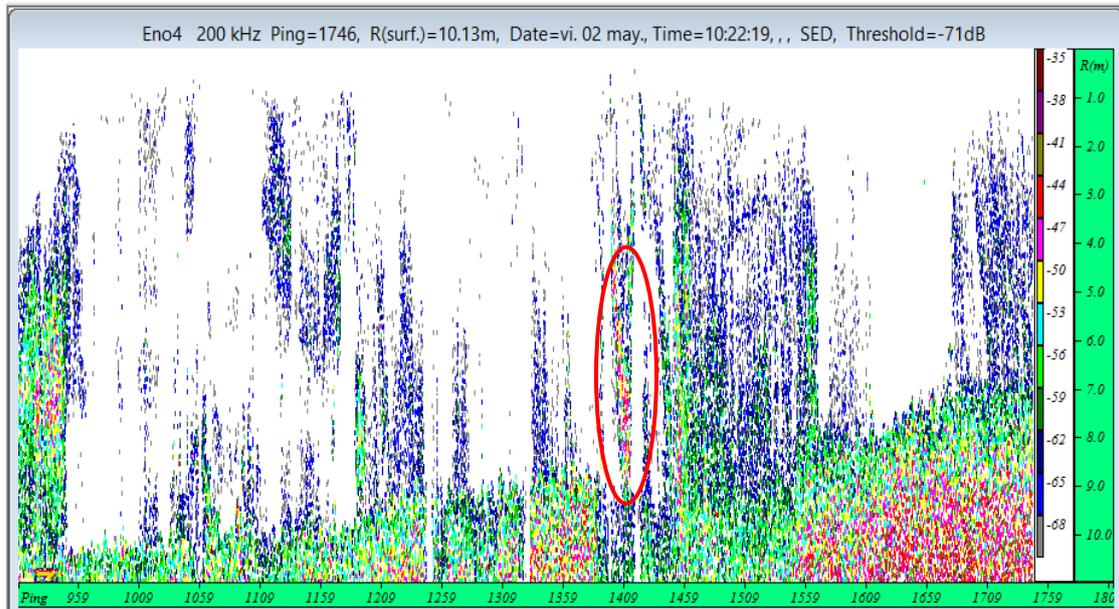


Figura 27. Ecograma SONAR5 PRO, rodeada la señal de la tortuga boba (*Caretta caretta*).

La segunda toma de medidas ha sido realizada durante la suelta de un ejemplar juvenil liberado exclusivamente para el presente estudio. El ejemplar de unos 37 kg, ha tenido un comportamiento mucho más favorable que en el caso anterior, permaneciendo entre los 4 y 8 metros de profundidad y emergiendo periódicamente a la superficie para respirar.



Figura 28. Buzo junto al ejemplar detectado acústicamente

Detección acústica de la tortuga boba (*Caretta caretta*) mediante técnicas activas

También acompañaron las condiciones meteorológicas, tanto el buen tiempo atmosférico como el buen estado del mar y la visibilidad bajo superficie, lo que hizo posible el seguimiento del rumbo tomado por la tortuga mediante la presencia de buzos además de unos datos mucho más claros y fáciles de interpretar . De esta manera, la embarcación científica ha podido realizar diversos barridos paralelos a la dirección tomada para favorecer la interacción del animal con el haz acústico para su detección.



Figura 29. Seguimiento de la tortuga con la presencia de buzos.

A diferencia del primer muestreo, en este caso, al ser una suelta exclusiva para la universidad, se ha podido obtener un número de medidas mayor, concretamente 16, que una vez procesadas con el software en el laboratorio, proporcionan un mayor número de datos para aumentar el tratamiento estadístico y consecuentemente unos resultados más fiables.

Resumiendo los resultados obtenidos, adjuntando las medidas de *TS* en Información adicional, con un valor máximo en el intervalo de [-40,-37] dB.

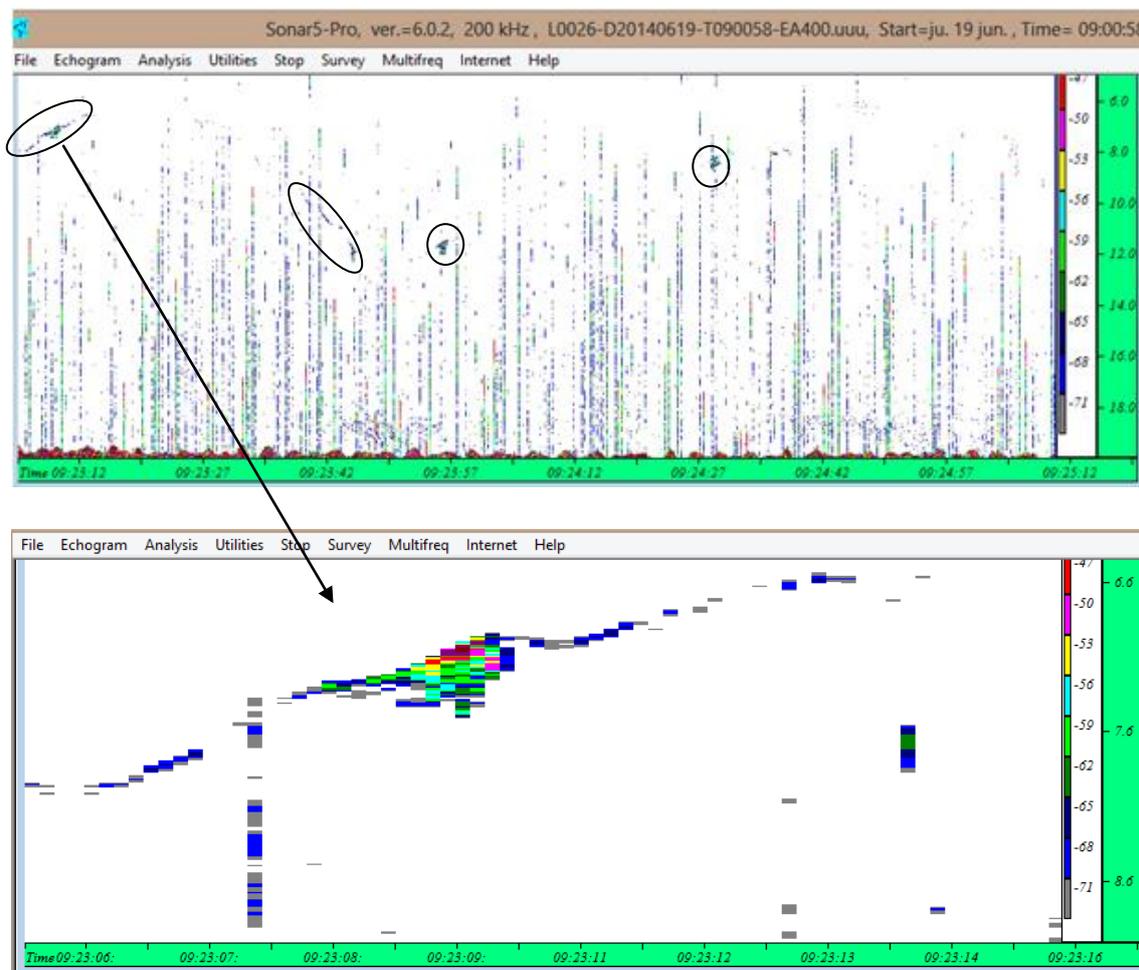


Figura 30. Ecograma donde se muestran diversas detecciones acústicas de la tortuga.

4 Discusión de los resultados

Se ha determinado por primera vez la velocidad de propagación en el material que compone el caparazón de la tortuga *Caretta caretta*. El resultado obtenido, $c = 2930 \pm 110$ m/s, es coherente cuando se compara con otros materiales biológicos de composición similar. Comparando con velocidades de propagación del sonido en otros medios como la espina de pescado ($c_{\text{espina}} = 2200\text{--}2500$ m/s)[9] que está compuesta fundamentalmente de cartílago, o el hueso ($c_{\text{hueso}} = 3600$ m/s) [19] con los resultados obtenidos en el caparazón, compuesto por un material con propiedades mecánicas intermedias, proporcionan un valor intermedio. Este valor, junto con la densidad, permite determinar la impedancia acústica del caparazón, y además de aumentar el conocimiento sobre éste, se pueden realizar análisis y simulaciones numéricas que faciliten el estudio de la respuesta acústica de la tortuga.

Con herramientas de medición que permitieran realizar mediciones del espesor con suficiente precisión en otros puntos del caparazón se dispondría de más puntos para reforzar el peso estadístico de la gráfica 1 pero la falta de presupuesto para invertir en ello y la limitación de

preservar el estado del caparazón lo han dificultado. En cualquier caso, la calidad del ajuste y fundamentalmente la coherencia de los resultados con otros conocidos reafirman tanto proceso como el resultado obtenido.

Por otro lado, se ha diseñado el dispositivo experimental para detectar objetos situados en la columna de agua en general y en particular se ha aplicado por primera vez a la detección de tortugas marinas, en este caso la tortuga boba nadando en mar abierto. Este trabajo es un trabajo altamente interdisciplinar en el que se relacionan distintos campos y técnicas de conocimiento. El trabajo ha sido desarrollado desde la base, incluyendo desde la configuración y elección de la ecosonda, la realización de las inmersiones de buceo, la construcción del soporte hasta el seguimiento de los ejemplares de tortuga.

Inicialmente se ha valorado cuál es el umbral de detección utilizando únicamente un caparazón y se han comparado los valores obtenidos con los de un buzo. Posteriormente, y gracias al acuerdo existente con el centro de recuperación ARCA (Oceanogràfic-Conselleria de Medi Ambient) se ha medido un ejemplar de *Caretta caretta* acústicamente utilizando un sónar de barrido lateral de 200 kHz.

Los resultados muestran que las tortugas marinas tienen una respuesta acústica mucho mayor que la mayoría de los objetos que podemos encontrar en la columna de agua, a excepción de los cetáceos, que presentan respuestas mucho mayores y por tanto diferenciables. La diferencia obtenida señales acústicas de un objeto i respecto la de otro objeto j en la dirección de la onda incidente, que vienen dadas por la relación de intensidades expresada en forma logarítmica: $\Delta(TS_{ij}) = 10 \log(I_{bs,i}/I_{bs,j})$. En nuestro trabajo comparamos la señal de la tortuga con la señal de un buzo y con la procedente sólo por parte del caparazón, lo que permite también comparar el efecto de los pulmones.

Es conocido que el valor del TS de un buceador es mayor que el de muchas especies que se encuentran en la columna de agua y notablemente menor que el de grandes cetáceos, como delfines o ballenas jorobadas [2], de los cuales es perfectamente distinguible, con un $\Delta(TS_{cetáceo,buzo})$ de aproximadamente 10 dB. Cuando comparamos la diferencia de señal entre la tortuga y el buzo es de $\Delta(TS_{tortuga,buzo}) = 1 \text{ dB}$. Por tanto, la señal de ambos obstáculos tienen valores similares, como era de esperar dadas las semejanzas, desde el punto de vista acústico, de los dos objetos (recordemos que la señal proviene principalmente de los pulmones, y en ambas especies los pulmones tienen un tamaño similar, el mayor apantallamiento por parte del caparazón en la tortuga y sólo de la caja torácica por parte del buceador se ve compensado por una mayor región –extremidades- sin aire en el caso del buceador que disminuyen el valor promedio del TS). Si la señal de un buzo es por tanto distinguible de la mayoría de objetos,

también lo será la de la tortuga marina que tiene valores similares, y no existe riesgo de confusión, ya que los buceadores siempre se encuentran debidamente identificados por motivos de legislación y seguridad. La señal bimodal del buzo nos muestra, además, que no sólo el valor promedio del TS sino también la forma de su distribución de valores permite obtener información que facilita la identificación del objeto.

La importancia de los pulmones, es decir, de aire, queda de manifiesto cuando se compara la señal obtenida en la medición de la tortuga con la del caparazón aislado. En este caso la diferencia es de, $\Delta(TS_{tortuga,caparazón})=7.2 \text{ dB}$, una diferencia notable y perfectamente apreciable.

A pesar del trabajo realizado, muchos aspectos quedan abiertos a nuevas investigaciones, pues los pocos trabajos existentes sobre las aplicaciones de la acústica submarina en tortugas hace que sea un área con muchas vías de investigación abiertas. Fomentar este tipo de estudios es crucial para la realización de censos de muchas especies, que como particularmente el caso de la tortuga boba, a pesar de su "poco interés económico", se encuentran amenazados.

Aunque en este trabajo se presenta la primera medida acústica de la que se tiene conocimiento de *Caretta caretta* en libertad, para una determinación unívoca de la respuesta acústica de la tortuga que permita distinguirla de otras especies es necesario realizar un mayor número de mediciones que permitan un tratamiento estadístico de los datos. Gracias al acuerdo de colaboración existente entre el centro de recuperación de tortugas de l'Oceanogràfic-Conselleria de Medi Ambient y el Instituto para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC) de la Universidad Politécnica de Valencia, está previsto obtener mediciones de más ejemplares aprovechando la suelta de animales recuperados.

Así mismo, hay aspectos que deben considerarse en la detección de las tortugas con técnicas acústicas, como es la variabilidad del volumen de aire en los pulmones con la presión ejercida por la profundidad [18]. Como se ha visto, la señal predominante que se obtiene de una tortuga viva es debido al aire que contienen sus pulmones, pero este volumen varía en función de la profundidad y/o del tiempo de inmersión. La variación de la respuesta acústica en términos de la variación del aire en los pulmones es una línea abierta que debería ser abordada en un futuro.

Este trabajo proporciona los primeros datos para generar una herramienta acústica que permita identificar las tortugas marinas que se encuentran en la columna de agua, distinguirlas de otras especies y así poder realizar censos con un método alternativo, más fiable y mucho más económico que los métodos actuales. Estas herramientas se están utilizando para censar otras especies de mayor impacto económico, como es el caso del atún rojo (*Bluefin tuna*) [20]. La configuración desarrollada permite cubrir un área extensa y con una atenuación mucho menor que las altas frecuencias. Dado que las tortugas son animales solitarios y que nadan mucho

Detección acústica de la tortuga boba (Caretta caretta) mediante técnicas activas

tiempo cerca de superficie, otros dispositivos, como las ecosondas verticales que se utilizan para la detección de biomasa en pesqueros, son de poca utilidad en el caso de la detección de las tortugas. La detección con sónares de barrido lateral en su configuración habitual sólo permite detectar eficientemente tortugas situadas en el suelo. Ecosondas multihaz podrían ser utilizadas también para este propósito, pero su elevado coste hace que tan sólo algunos buques oceanográficos dispongan de ellas, y por tanto que el acceso a ellas sea extremadamente dificultoso y reduzca la viabilidad del proyecto.

La configuración alternativa del sónar de barrido lateral que se presenta proporciona una herramienta para detectar tortugas en la columna de agua, pero puede ser utilizado para detectar otros obstáculos situados en dicha columna.

Los resultados de esta investigación han sido aceptados para su difusión en el 3rd International Marine Conservation Congress (14-18 de Agosto, Glasgow).

5 Conclusiones

Las principales contribuciones de este trabajo son dos.

Por un lado, se ha caracterizado por primera vez la velocidad de propagación del sonido en el material que constituye el caparazón de la tortuga *Caretta caretta* que junto con la densidad, permite determinar la impedancia acústica del caparazón, y además de aumentar el conocimiento sobre éste, permite la realización de análisis y simulaciones numéricas que faciliten el estudio de la respuesta acústicas de la tortuga.

Por otro lado, la contribución más original de este trabajo la constituye el método diseñado para detectar tortugas marinas en general, y la tortuga boba en particular, en mar abierto. Se ha presentado la primera medida cuantitativa de la señal acústica de una tortuga boba viva nadando en libertad. Inicialmente se ha valorado cuál es el umbral de detección utilizando únicamente un caparazón y se han comparado los valores obtenidos con los de un buzo. Posteriormente, y gracias al acuerdo existente con el centro de recuperación ARCA (Oceanogràfic-Conselleria de Medi Ambient) se han medido dos ejemplares de *Caretta caretta* acústicamente utilizando un sónar de barrido lateral de 200 kHz. EL *TS* de la tortuga, de valor similar al de un buzo, puede ser comparado con el de otros objetos situados en la columna de agua.

Este trabajo proporciona los primeros datos para generar una herramienta acústica que permita identificar las tortugas marinas que se encuentran en la columna de agua, distinguirlas de otras especies y así poder realizar censos con un método alternativo, más fiable y mucho más económico que los métodos actuales. La configuración desarrollada permite cubrir un área extensa y con una atenuación mucho menor que las altas frecuencias.

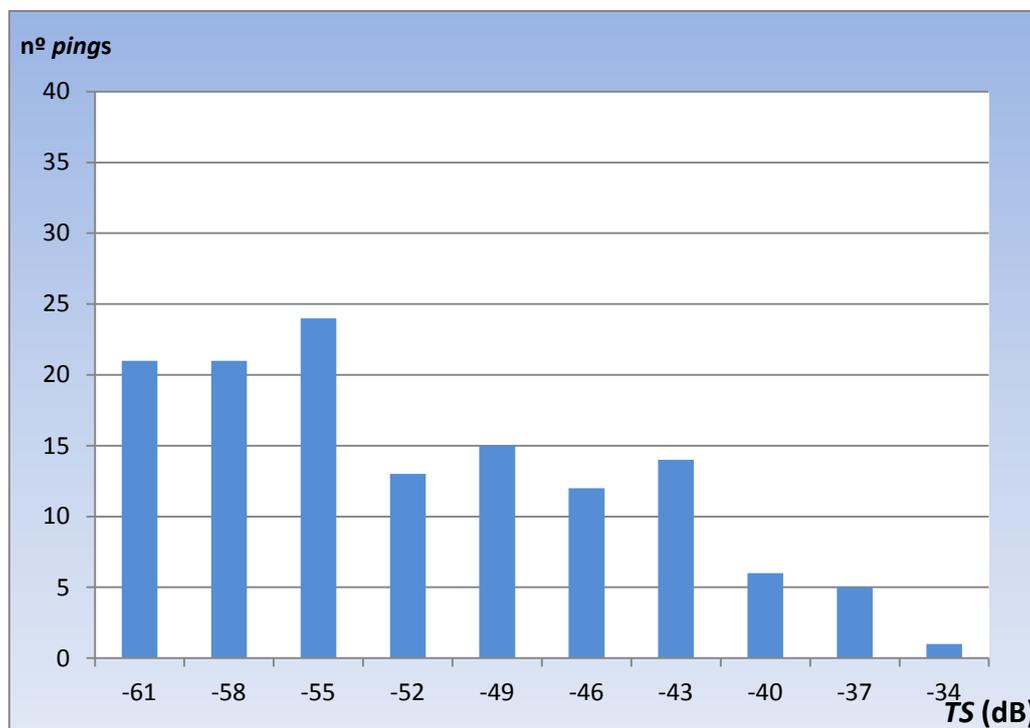
6 Bibliografía

- [1] LURTON, X. *An introduction to underwater acoustics: principles and applications*. Springer. (2002).
- [2] SARANGAPANI, S. MILLER, J. H. POTTY, G.R. REEDER, D.B. STANTON, T.K. CHU, D. *Measurements and modeling of the target strength of divers. Oceans 2005-Europe*. Vol. 2. IEEE, (2005).
- [3] SOS OCÉANOS *Protegiendo mares y océanos* [en línea]. 5 Noviembre 2010. <<http://sosoceanos.blogspot.com.es/2010/11/los-desechos-plasticos-estan-matando.html>> [Consulta: 22 de mayo de 2014].
- [4] GARCÍA, R. REQUERA, S. RODRÍGUEZ, R. SAN FÉLIX, M. SEGOVIA, E. VALLADARES, M.A. *Tortuga boba: situación, amenazas y medidas de conservación*. Propuesta de WWF/Adena. Madrid. (2002).
- [5] OCEANA *Protegiendo los Océanos del Mundo. Tortugas marinas en el anzuelo* [en línea]. NU2 Mar y Arte. <<http://nu2.es/listas/reportajes/tortugas-marinas-en-el-anzuelo/>> [Consulta: 22 de mayo de 2014].
- [6] PÉREZ, A. *El drama de las tortugas marinas* [en línea]. Magia Canina ,Julio de 2013. <<http://magiacanina.blogspot.com.es/2013/07/el-drama-de-las-tortugas-marinas.html>> [Consulta: 02 de junio de 2014].
- [7] ISAN, A. *Las tortugas comen más plástico que nunca* [en línea]. Ecología Verde. Desarrollo sostenible para un mundo mejor. 14 Agosto 2013. <<http://www.ecologiaverde.com/tag/tortugas/>> [Consulta: 28 de mayo de 2014].
- [8] MERCHÁN, M. (ED.).BITÓN, S. TOMÁS, J. MARTÍNEZ-SILVESTRE, A. PARGA, M. AGUILAR, M. *Tortugas marinas de la Comunidad Valencina: conservación y manejo*. Monografías de la Asociación Chelonia Vol II. Imprenta Publicequipo. Madrid (España). 222 p. ISBN:978-84-614-2054-2. (2010).
- [9] SIMMONDS, J. MACLENNAN D. *Fisheries Acoustics: Theory and Practice* . John Wiley & Sons, (2008).
- [10] PARGA, M.L. SÁNCHEZ, J. OLDANI, C. MONNÀ, A. *The potential of the side-scan sonar technology for the study of sea turtles*, In: Proceedings of the 31st Annual Symposium on Sea Turtle Biology and Conservation, US Dept. Commerce, NOAA Technical Memo. España. (2011).
- [11] MAHFURDZ, A., AHMAD, H., KADIR, SA, ABDULLAH, S. SULONG, N. *Acoustic Strength of Green Turtle and Fish Based on FFT Analysis*. International Journal of Advanced Computer Science & Applications, vol.4, n°9. (2013).
- [12] SILVA, R.D. DEALTERIS, J.T. MILLIKEN, H.O. *Evaluation of a Pound Net Leader Designed to Reduce Sea Turtle Bycatch*. Marine Fisheries Review , vol. 73, n°3, p.36-45, (2011).
- [13] DAVY, C. FENTON, B. *Technical note: side-scan sonar enables rapid detection of aquatic reptiles in turbid lotic systems*. European Journal of Wildlife Research vol. ,59.1: p.123-127, (2013).

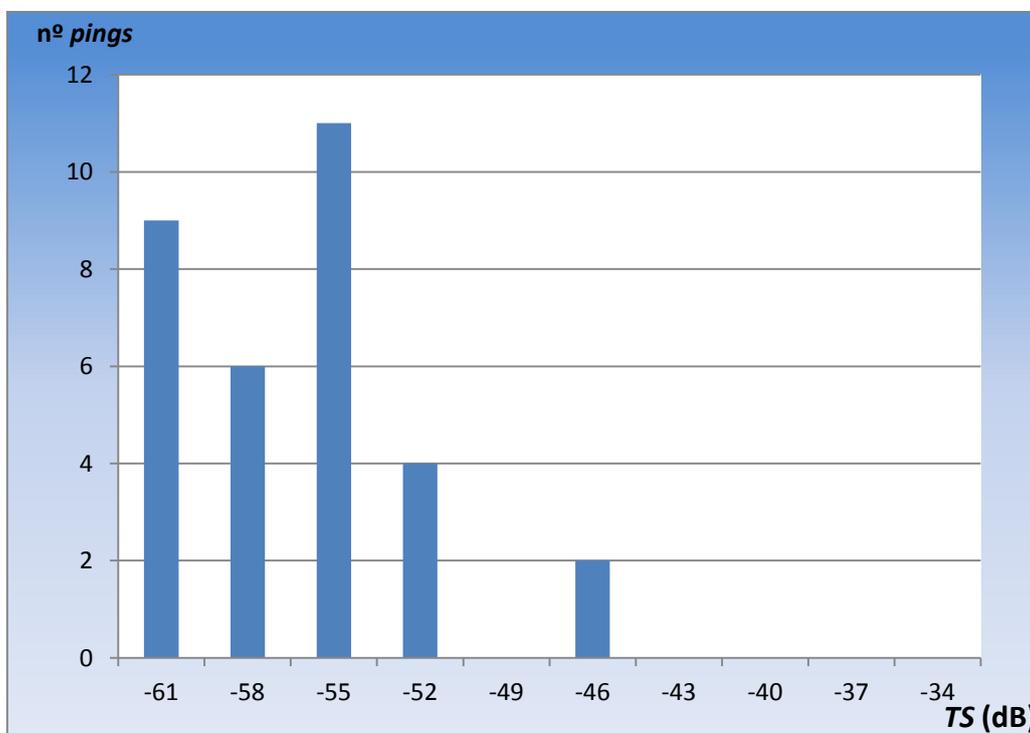
- [14] HODGES, JUSTIN E. *Evaluation of loggerhead sea turtle carapace properties and prototype biomimetic carapace fabrication*. NDLTD Union Catalog.Thesis (M.S.).Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, (2009). y referencias contenidas.
- [15] JUÁN-SENABRE, J. *Estudio de la velocidad de propagación de los ultrasonidos en un medio viscoso*. Trabajo final de grado. Ingeniería en sistemas de telecomunicaciones, sonido e imagen. Escuela Politécnica Superior de Gandía, (2013).
- [16] SÁNCHEZ-CARNERO, N. *Técnicas acústicas y software libre: aplicaciones en la gestión costera*. Tesis doctoral. España: Universidad de la Coruña, (2012).
- [17] MEDWIN, H. *From ocean acoustics to acoustical oceanography*. Cambridge University Press, Cambridge, (2005).
- [18] HOCHSCHEID, S. BENTIVEGNA, F. SPEAKMAN J.R. *The dual function of the lung in chelonian sea turtles: buoyancy control and oxygen storage*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, **297**. p.123-140, (2003).
- [19] ANJUMANARA, O. TURAN, S. BEREKET, A. *Reference data for bone speed of sound measurement by quantitative ultrasound in healthy children*. Archives of Osteoporosis.1.1-2. p.37-41, (2006).
- [20] DE LA GÁNDARA, F. ESPINOSA, V. *Estimación del número y la biomasa de individuos por métodos acústicos en el cultivo del atún rojo (*Thunnus thynnus*)*. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT **68.1** p.276-283, (2012).

7 Información complementaria

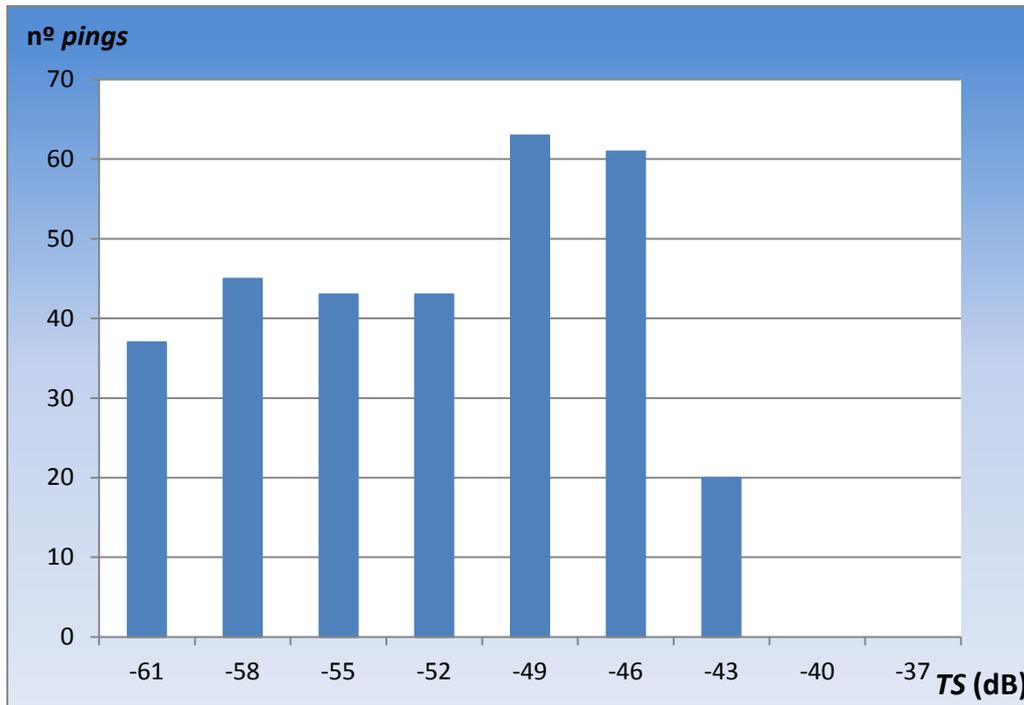
En las gráficas de los *TS*, se ha prescindido de los niveles inferiores, correspondientes a ruido de fondo, para poder visualizar mejor los datos de interés.



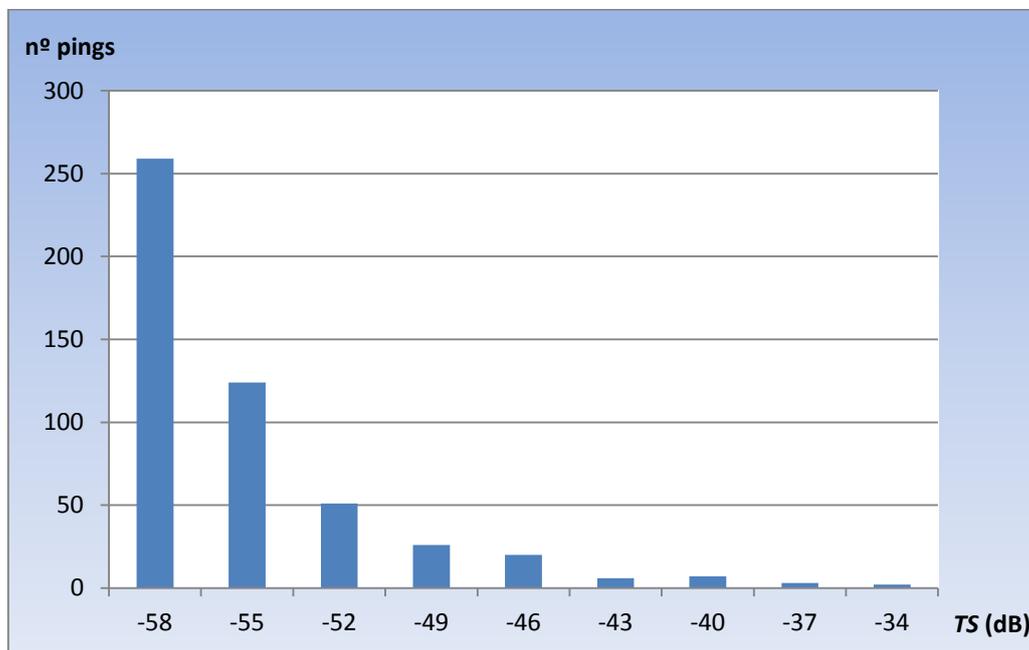
Gráfica 1. Distribución de *TS* correspondiente a un buzo.



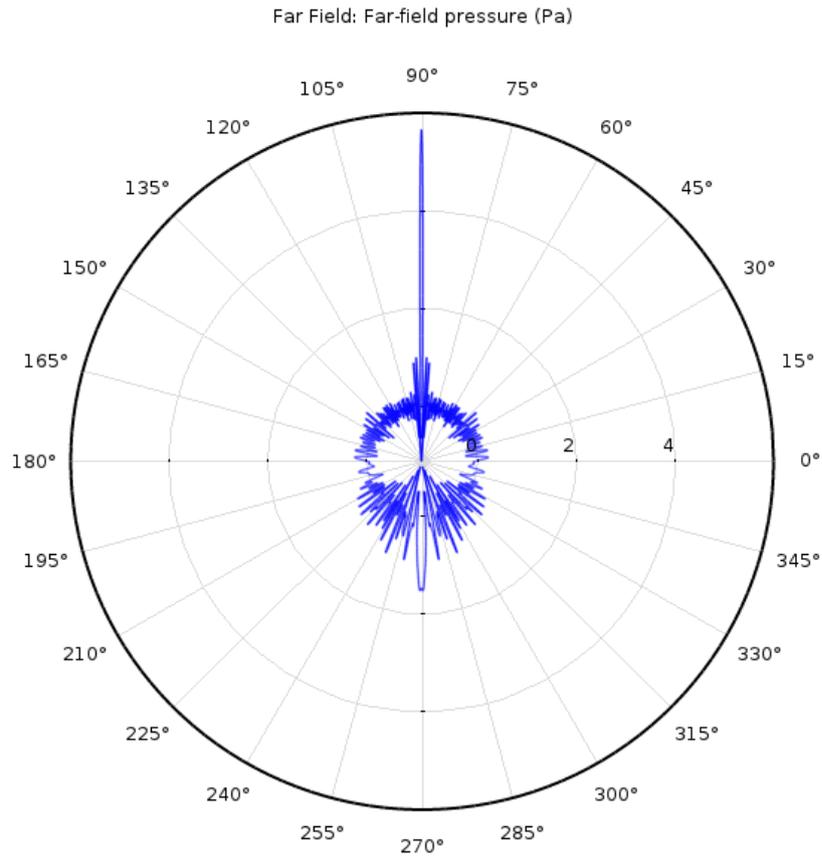
Gráfica 2. Distribución de *TS* correspondiente a las medidas del caparazón.



Gráfica 3. Distribución de *TS* en la primera medida de la tortuga *Caretta caretta*.



Gráfica 4. Distribución de *TS* en la segunda medida de la tortuga *Caretta caretta*.



Simulación numérica bidimensional correspondiente a la directividad de una tortuga para una onda plana incidente en dirección +Y de 38 kHz. Imagen cedida por J. Castaño.