

**UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA**

**Master en Ingeniería Acústica**

---



**UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA**



**ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA**

**“Medida de las características  
acústicas de los tejidos de las  
principales especies de tñidos  
tropicales”**

***TRABAJO FINAL DE MASTER***

**Autor/a:  
Lucía García Talavera**

**Tutor/a:  
Isabel Pérez Arjona**

***GANDIA, 2017***

## RESUMEN

El atún es un pescado muy popular en la alimentación en casi todo el mundo y, a su vez, varias de sus especies están catalogadas como amenazadas o en peligro de extinción. Debido a la escasez causada por la sobrepesca, así como al aumento de los costes relacionados con la industria pesquera, surge la necesidad de implementar nuevas técnicas para aumentar y mejorar las capturas. Los métodos acústicos activos son fundamentales para detectar e identificar los dispersores en el agua, como por ejemplo los bancos de peces. Los túnidos son de los que tienen un mayor valor económico y la industria del sector tiene especial interés tanto en ser capaz de detectarlos, como en distinguir la especie en particular, ya que el valor varía notablemente. Para ello es preciso caracterizar acústicamente los distintos tejidos de los túnidos, así como conocer su densidad para finalmente establecer su impedancia característica. Mediante técnicas ultrasónicas no destructivas se determinará la velocidad de propagación en los tejidos de dos especies de peces muy comunes: el atún listado y la caballa. Así mismo, mediante el principio de Arquímedes se determinará la densidad en los tejidos de dichos especímenes.

### Palabras clave:

Túnidos, Acústica submarina, Ultrasonidos, Ecoimpulso, Densitometría.

## ABSTRACT

Tuna is a very popular fish in the feeding in almost the whole world and, in turn, several of its species are catalogued as threatened or in danger of extinction. Due to the shortage caused by overfishing, as well as to the increased costs associated with the fishing industry, arise the need to implement new techniques to increase and improve catches. Active acoustic methods are essential for detecting and identifying scatterers in water, such as fish shoals. Tunas belong to those who have a major economic value and the industry is specially interested in being able to detect them, and to distinguish the specie particularly, since the value changes significantly. For this, it is necessary an acoustic characterization of the different tissues of the tuna, as well as to know its density for finally establishing its specific acoustic impedance. Using non-destructive ultrasonic techniques will be determined the speed of sound propagation in the tissues of two very common fish species: skipjack tuna and mackerel. Likewise, using the Archimedes' principle will be determined the density in the tissues of the above specimens.

### KEY WORDS

Tuna, Underwater acoustics, Ultrasounds, Echo impulse, Densitometry.

## Índice

1. Introducción .....	2
2. Objetivos .....	4
3. Metodología .....	5
3.1. Útiles de medida .....	5
3.2. Imprecisiones en las medidas .....	8
3.3. Cálculo velocidad del sonido en el agua teórica .....	9
3.4. Conexión osciloscopio – Matlab.....	10
4. Calibración del sistema .....	11
4.1. Montaje con dos transductores iguales.....	12
4.2. Montaje con dos transductores distintos .....	14
4.3. Montaje con un transductor y un hidrófono .....	16
4.4. Justificación del sistema de medida elegido.....	18
4.5. Recalibración del sistema de medida.....	18
5. Caracterización acústica.....	20
5.1. Medidas con caballa (mackerel).....	20
5.1.1. Medidas con tejido muscular .....	20
5.1.2. Medidas con tejido óseo .....	22
5.2. Medidas con atún listado (skipjack tuna).....	23
5.2.1. Medidas con tejido muscular .....	23
5.2.2. Medidas con tejido óseo .....	25
6. Densitometrías .....	27
6.1. Introducción .....	27
6.2. Densidad de la caballa (mackerel).....	27
6.3. Densidad del atún listado (skipjack tuna) .....	29
6.3.1. Ejemplar 1 .....	29
6.3.2. Ejemplar 2 .....	31
7. Conclusiones y líneas de trabajo futuro .....	32
8. Bibliografía .....	34
Lista de figuras .....	35
Lista de tablas.....	36
Agradecimientos .....	37

## 1. Introducción

Los atunes son animales oceánicos pelágicos que viven en la parte del océano que está sobre la zona pelágica [1], de la superficie hasta los 200m de profundidad aproximadamente [2], su vida media está estimada en unos 15 años. El atún es un pescado muy popular en la alimentación en casi todo el mundo, viéndose incrementado su consumo por el desarrollo económico de países asiáticos y, en especial, por la globalización de la gastronomía relacionada con el atún, concretamente del sushi.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) [3], en 2010 las principales especies de atún que se explotaron con fines comerciales eran: *Katsuwonus pelamis* – *Skipjack tuna* (58,1% de capturas), *Thunnus albacares* – *Yellowfin tuna* (26,8% de capturas) y *Thunnus alalunga* - *Albacore* (5,9% de capturas). Las dos últimas están consideradas por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) [4] como especie “casi amenazada”, y sólo el atún listado (*Skipjack tuna*) está considerado como “preocupación menor”. Otras especies de túnidos, como el conocido atún rojo (*Thunnus thynnus* – *Atlantic bluefin tuna*), se encuentran catalogadas como “en peligro” principalmente por la sobrepesca que ha sufrido a lo largo de varias décadas.

Debido a la escasez causada por dicha sobrepesca, así como al aumento de los costes relacionados con la industria pesquera, surge la necesidad de implementar nuevas técnicas para aumentar y mejorar las capturas.

Los métodos acústicos activos son fundamentales para detectar e identificar los dispersores que se encuentran en la columna de agua a partir de la energía acústica retrodispersada por dichos dispersores. Uno de los dispersores de mayor interés son los bancos de peces. De entre ellos, los túnidos son de los que tienen un mayor valor económico y la industria del sector tiene especial interés tanto en ser capaz de detectarlos, lo cual está relativamente bien establecido en la actualidad, como en ser capaz de distinguir la especie en particular, ya que el valor varía notablemente con la especie de atún.

Para caracterizar la energía retrodispersada por los atunes, es preciso caracterizar acústicamente los distintos tejidos de los que están formados: tejido muscular y óseo. En este Trabajo Final de Máster (en adelante, TFM) se pretende medir mediante técnicas ultrasónicas no destructivas (técnica de eco impulso) la velocidad de propagación de ambos tejidos en dos especies de peces muy comunes: el atún listado (*Katsuwonus pelamis* – en inglés: Skipjack tuna) y la caballa (*Scomber scombrus* – en inglés: Mackerel).

La técnica de eco impulso es la utilizada en las ecosondas en pesquerías, y la reproducida en el presente TFM. Una ecosonda es un sistema sonar que transmite generalmente en vertical impulsos sonoros para luego captar los diferentes ecos recibidos, que servirán para ubicar los objetos que se encuentren en el volumen de agua cubierto por su haz o haces. Según el haz acústico, existen ecosondas de haz simple, multihaz o de barrido lateral. [5]

La mayoría de los sistemas de acústica submarina se diseñan para recibir ecos de diferentes objetos, la onda acústica que incide sobre estos es dispersada en todas direcciones y una parte de esa dispersión retorna hacia el emisor, la intensidad recibida en el emisor dependerá de los objetos, o peces en este caso, que la onda se encuentre a su paso. El Target Strength (TS) o factor de blanco es la razón entre la intensidad retrodispersada hacia el emisor y la que incide sobre el objeto [6]. En el caso particular de la dispersión acústica por peces, el aspecto que más influye es la presencia o no de vejiga natatoria, donde el contraste de impedancias en la

interfase agua-aire hará que se refleje mayor o menor cantidad de energía. En el caso de especies con ausencia de vejiga natatoria, como ocurre con el atún listado o la caballa, el papel que juegan en la energía retrodispersada la impedancia acústica de los tejidos musculares y óseos del pez se vuelve más relevante. Si el contraste de impedancias es pequeño, incidirá mayor cantidad de energía y se reflejará menos, por el contrario, si el contraste de impedancias es mayor, incidirá una pequeña cantidad de energía y se reflejará la mayor parte.

La impedancia acústica está relacionada con la propagación de las ondas sobre el medio: es la resistencia que opone dicho medio a que las ondas se propaguen sobre él. La impedancia característica de un material se define como el producto entre la densidad  $\rho$  y la velocidad del sonido  $c$  en dicho material,  $Z_0 = \rho * c$ . [7]

## 2. Objetivos

El objetivo principal del presente Trabajo Final de Máster (en adelante, TFM), es caracterizar la velocidad de propagación del sonido a través de los tejidos de distintas especies de túnidos mediante técnicas ultrasónicas. Debido a la dependencia de una organización externa como facilitadora de las especies a estudio, solo se han podido conseguir finalmente dos ejemplares de una especie de túnido, el atún listado (*skipjack tuna*), así como diversos ejemplares de caballa (*mackerel*). Por ello, además de la caracterización acústica y densimétrica del atún listado, se procederá de igual manera con la caballa. Al existir más bibliografía previa sobre ésta, servirá para validar los métodos de medida pudiendo comparar los resultados obtenidos con los ya existentes. Una vez conocidos los valores de densidad y velocidad, se podrá hallar la impedancia acústica característica de cada uno de los tejidos.

Todo esto se realiza con el fin de mejorar en un futuro la identificación de los distintos peces en mar abierto, en especial de las distintas especies de atún, dadas las elevadas diferencias de valor en el mercado según de qué especie se trate.

Por tanto, los objetivos específicos del trabajo son:

- Establecer una metodología para medir la velocidad del sonido,  $c$ , en tejidos de distintas especies.
- Establecer una metodología para medir la densidad,  $\rho$ , en tejidos de distintas especies.
- Validar dichas metodologías con resultados conocidos, en este caso con resultados de caracterización de caballa (*mackerel*).
- Determinar la velocidad del sonido,  $c$ , y la densidad,  $\rho$ , para el atún listado (*skipjack tuna*).
- Determinar la impedancia acústica característica de cada uno de los tejidos en ambas especies.

### 3. Metodología

En el presente capítulo se pretende mostrar la metodología llevada a cabo durante el Trabajo Final de Máster (en adelante, TFM).

#### 3.1. Útiles de medida

Para realizar las medidas en el laboratorio, se han utilizado los siguientes instrumentos y herramientas:

- Generador de funciones Tektronix AFG2021



Figura 1: Generador de funciones

- Osciloscopio digital Tektronix TDS2022C



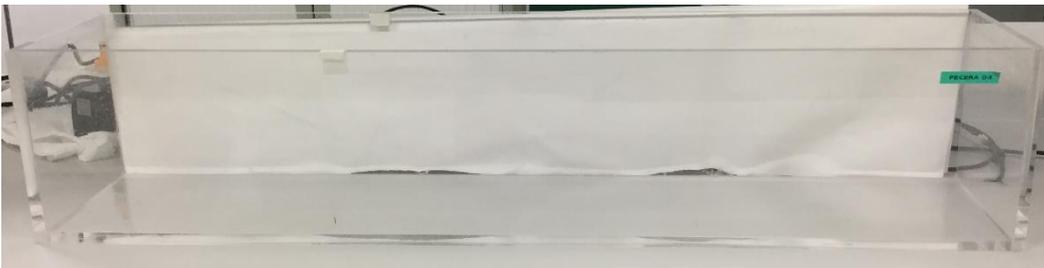
Figura 2: Osciloscopio

- Amplificador de ultrasonidos



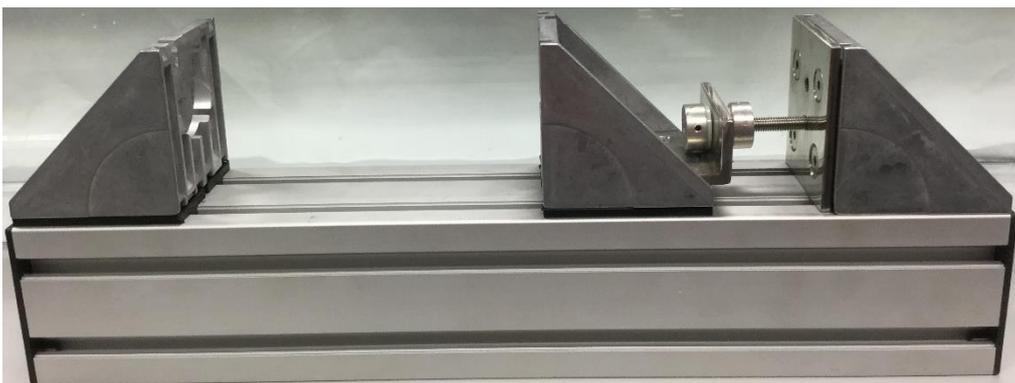
*Figura 3: Amplificador*

- Pecera
  - Ancho: 0,18 m.
  - Largo: 1 m.
  - Profundidad: 0,2 m.



*Figura 4: Pecera*

- Soporte de aluminio



*Figura 5: Soporte aluminio*

- Transductores Airmar de 120kHz y 200kHz



*Figura 6: Transductor Airmar*

- Hidrófono TC4034



*Figura 7: Hidrófono*

- Ordenador con Windows10.
- Cinta métrica, pie de rey, cable USB, cables BNC-BNC, cables BNC-cocodrilo.

A continuación, se muestran unas imágenes del montaje completo en distintas fases de trabajo:

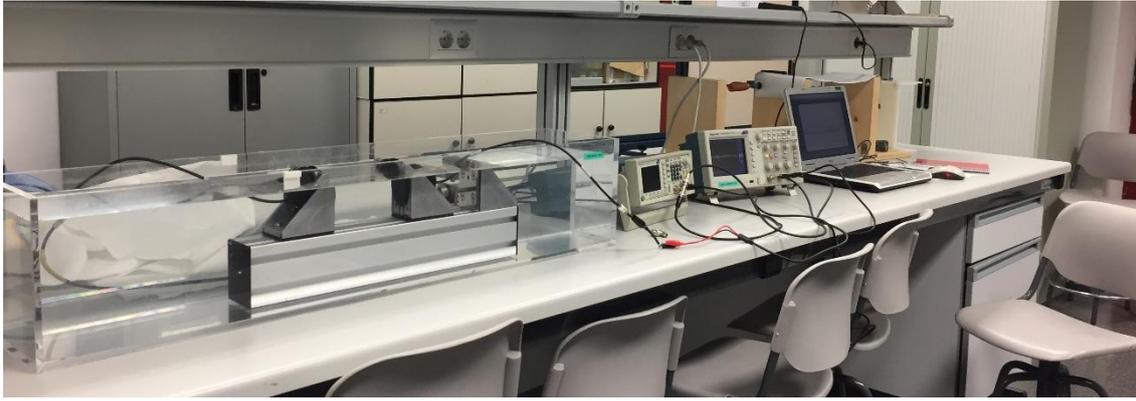


Figura 8: Montaje

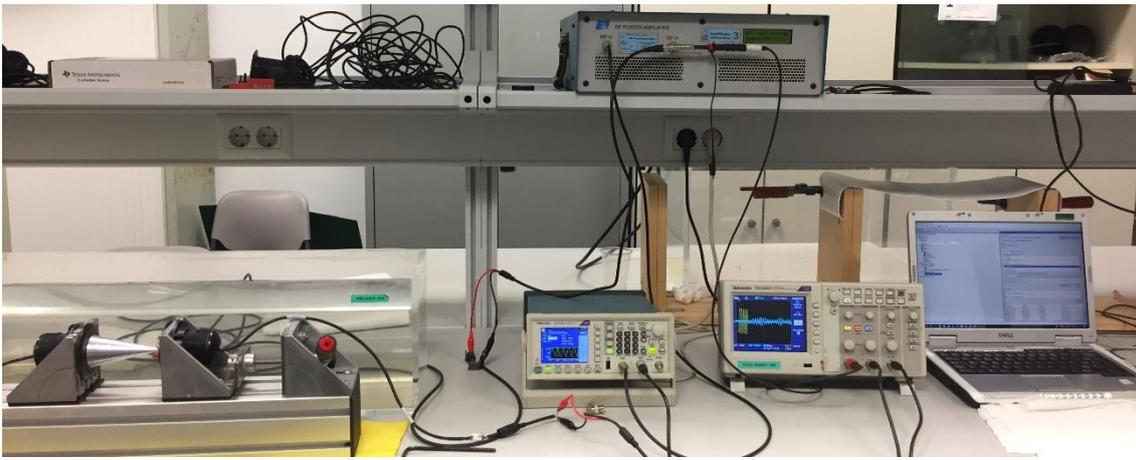


Figura 9: Montaje

### 3.2. Imprecisiones en las medidas

Todas las mediciones que se han realizado conllevan ciertas imprecisiones, ya sea debido al error humano o instrumental, y por tanto se han de tener en cuenta a la hora de trabajar con los datos o graficar resultados. A continuación, se describe qué errores se han considerado en el caso de las medidas realizadas en el presente TFM:

- Gráficas velocidad del sonido:

Tanto en la calibración del sistema como en las medidas con pescado, se representa la velocidad del sonido en el medio obtenida en cada caso. Para ello, se han de considerar los errores en el espacio y en el tiempo:

- En el espacio, correspondiente al eje Y, se tiene un error de  $10^{-4}$  metros, debido a la precisión con la que trabaja el pie de rey.
- En el tiempo, correspondiente al eje X, el error será la inversa de la frecuencia de muestreo utilizada en cada medida, siendo el valor más usado  $10^{-7}$  segundos.

Dichos errores son utilizados para el cálculo y representación de las barras de error en las gráficas correspondientes a la velocidad del sonido en el medio, aunque como se irá viendo en los posteriores capítulos, al tener los errores un grado de magnitud muy inferior a las medidas, dichas barras de error no serán muy apreciables en las figuras.

- Densitometrías:

La báscula de precisión utilizada en las densitometrías ha sido la *KERN EW600-2M*, cuyo error instrumental a considerar es de 0,01 gramos, tal y como se muestra en la imagen a continuación:



Figura 10: Báscula de precisión

Así mismo, en la densitetría se calcula la dispersión entre medidas como [8]:

$$D = \frac{|x_{max} - x_{min}|}{\bar{x}} * 100$$

El error o desviación típica como:

$$\varepsilon = \sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}}$$

Y el error total de la densidad como:

$$\varepsilon(\rho) = \bar{\rho} * \left[ \left| \frac{\varepsilon(M)}{\bar{M}} \right| + \left| \frac{\varepsilon(V)}{\bar{V}} \right| \right]$$

Siendo:

- $\bar{\rho}$  la densidad media.
- $\varepsilon(M)$  el error o desviación típica de la masa.
- $\bar{M}$  el promedio de la masa.
- $\varepsilon(V)$  el error o desviación típica del volumen.
- $\bar{V}$  el promedio del volumen.

### 3.3. Cálculo velocidad del sonido en el agua teórica

Teniendo en cuenta las condiciones ambientales, en cada medida de calibración se calcula la velocidad del sonido en el agua teórica mediante la siguiente fórmula de Medwin [9]:

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.010T)(S - 35) + 0.016Z$$

Siendo:

- T la temperatura del agua en °C.
- S la salinidad del agua en Unidades Prácticas de Salinidad (PSU).
- Z la profundidad en metros.

Así mismo, se calcula el error en  $c$  considerando el error en la temperatura ( $ET$ ) de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  debido a la sonda utilizada en las mediciones, y derivando de la ecuación de la velocidad se obtiene:

$$ErrorC = (4.6 - 2 * 0.055T + 3 * 0.00029T^2 + 0.35 - 0.01S) * ET$$

### 3.4. Conexión osciloscopio – Matlab

En cuanto a la adquisición de los datos, además de realizar una primera aproximación manual en las medidas, se ha procedido a guardar la información proporcionada por el osciloscopio para posteriormente tratarla con el software matemático Matlab.

Para ello, primero se obtuvo desde la web del fabricante del osciloscopio (<http://www.tek.com/>) los drivers para el ordenador de trabajo relacionados con Matlab. Una vez instalados, gracias al protocolo VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*) de Tektronix, se conecta mediante USB el ordenador y el osciloscopio.

A continuación, en el software Matlab mediante su *toolbox* de control de instrumentos, se conecta el osciloscopio y ya se muestran las opciones que se pueden realizar con este tipo de conexión. En la imagen a continuación se observa cómo se adquiere con la función utilizada para leer los canales del osciloscopio: *readwaveform*:

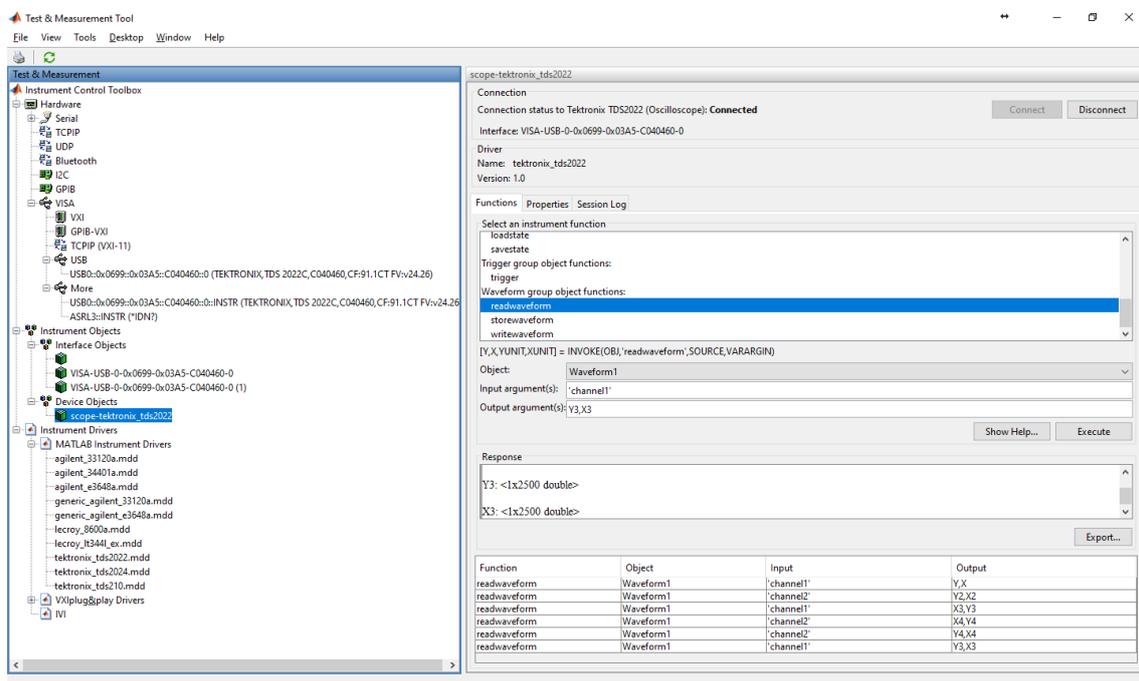


Figura 11: Conexión Matlab

De esta forma, se puede ir adquiriendo en ambos canales las señales que en ese momento se muestran en el osciloscopio, guardando en diferentes vectores las componentes X e Y. Cada vector se guarda en formato "1x2500 double", es decir, 1 fila y 2500 columnas con doble precisión.

## 4. Calibración del sistema

Antes de proceder con la caracterización acústica, se realizan unas calibraciones con distintos montajes para decidir cuál será el mejor sistema de medida. En este capítulo, se describen los 3 montajes realizados y sus resultados, así como la justificación del sistema elegido.

Para saber la diferencia de tiempos de llegada, es decir el retardo de la señal, se procede a comparar los máximos de la correlación cruzada y la autocorrelación en cada medida. De esta forma, se obtiene el retardo en muestras ( $\Delta x$ ) que, una vez dividido por la frecuencia de muestreo, se define como la diferencia entre ambas señales ( $\Delta t$ ) con la que se calculará la velocidad del sonido en el medio en función de la distancia o del grosor de la muestra. En la imagen a continuación se puede observar cómo se realiza el cálculo con Matlab.

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{f_s}$$

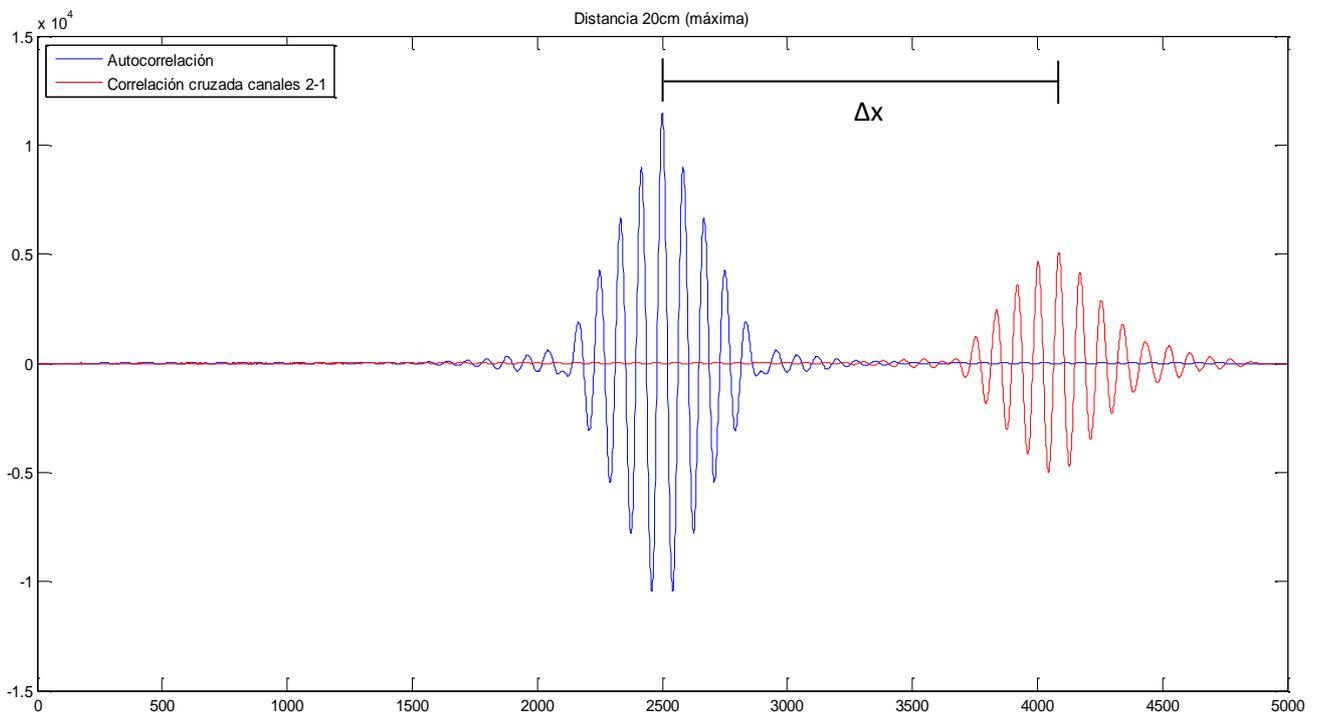
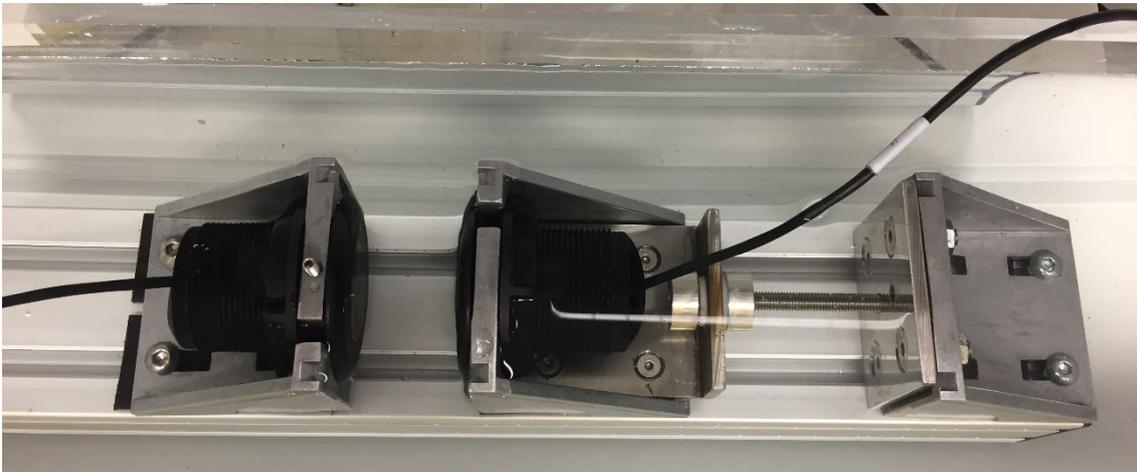


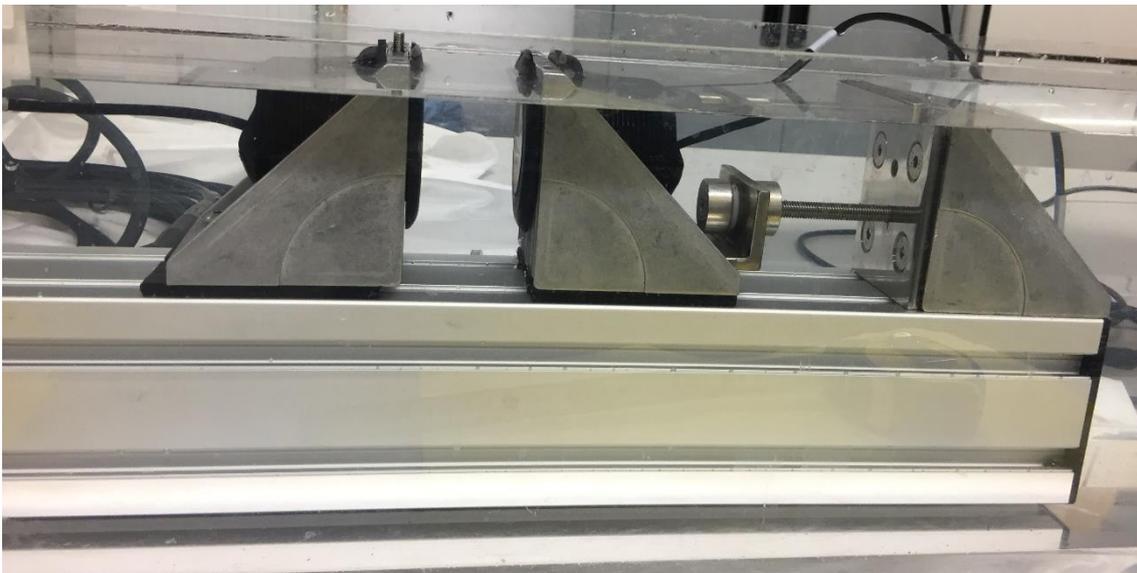
Figura 12: Diferencia de tiempos de llegada

#### 4.1. Montaje con dos transductores iguales

El primer montaje que se realiza es el formado por 2 transductores Airmar iguales con una frecuencia de trabajo de 120kHz, tal y como se observa en las siguientes imágenes:



*Figura 13: Montaje dos transductores iguales*



*Figura 14: Montaje dos transductores iguales*

Las medidas se realizan variando la distancia entre los transductores, de 3 a 20 cm con variaciones de 0,5 cm. De esta forma, se obtiene para cada variación un valor en el tiempo correspondiente al retardo entre la señal emitida por un transductor y la recibida en el otro, que serán visualizadas en el osciloscopio en ambos canales y a su vez adquiridas con Matlab. La señal utilizada ha sido de tipo senoidal-Burst, 10Vpp (sin amplificador), 120kHz, 5 ciclos.

La temperatura del agua durante la calibración es de  $20,2 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , salinidad 0 PSU y profundidad de los transductores 0,025 metros. Mediante la fórmula de Medwin se obtiene una velocidad del sonido en el agua teórica de  $c = 1482,2 \pm 0,3$  m/s.

En la gráfica siguiente, se muestran los resultados del retardo de la señal según la distancia entre transductores, una vez se han adquirido los datos con Matlab, se les ha aplicado la autocorrelación y correlación cruzada, y se han restado los máximos.

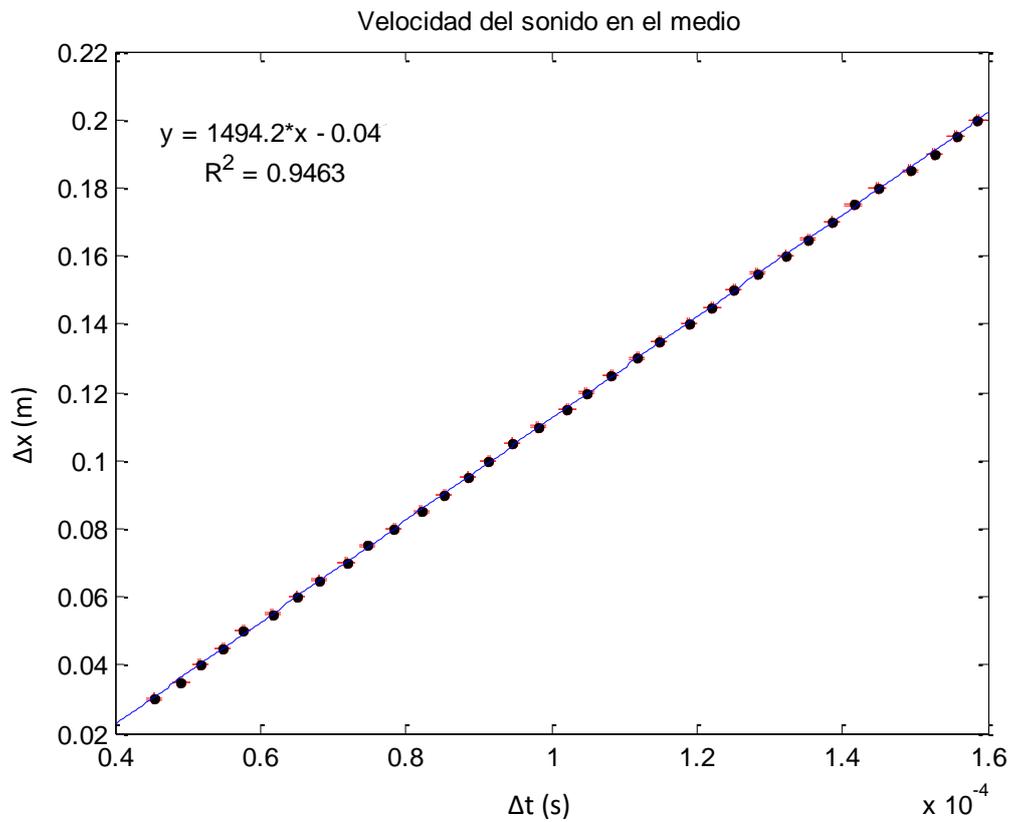


Figura 15: Velocidad del sonido en el medio

Tal y como se observa en la ecuación de la recta de ajuste, se obtiene una velocidad del sonido en el medio de  $c = 1494 \pm 3$  m/s.

Mediante la recta de ajuste, se obtiene la corrección que se aplicaría a los datos:

$$\frac{0.0371}{1494.2} = 2.48293E^{-05} \text{ (s)}$$

#### 4.2. Montaje con dos transductores distintos

El segundo montaje que se realiza es el formado por 2 transductores Airmar distintos, uno con una frecuencia de trabajo de 120kHz y el otro de 200kHz, tal y como se observa en las siguientes imágenes:



*Figura 16: Montaje dos transductores distintos*



*Figura 17: Montaje dos transductores distintos*

Las medidas se realizan igual que en el anterior montaje, variando la distancia entre los transductores, de 3 a 20 cm con variaciones de 0,5 cm. La señal utilizada ha sido de tipo senoidal-Burst, 10Vpp (sin amplificador), 120kHz, 5 ciclos.

La temperatura del agua durante la calibración es de  $22 \pm 0,1$  °C, salinidad 0 PSU y profundidad de los transductores 0,025 metros. Mediante la fórmula de Medwin se obtiene una velocidad del sonido en el agua teórica de  $c = 1487,7 \pm 0,3$  m/s.

En la gráfica siguiente, se muestran los resultados del retardo de la señal según la distancia entre transductores, una vez se han adquirido los datos con Matlab, se les ha aplicado la autocorrelación y correlación cruzada, y se han restado los máximos.

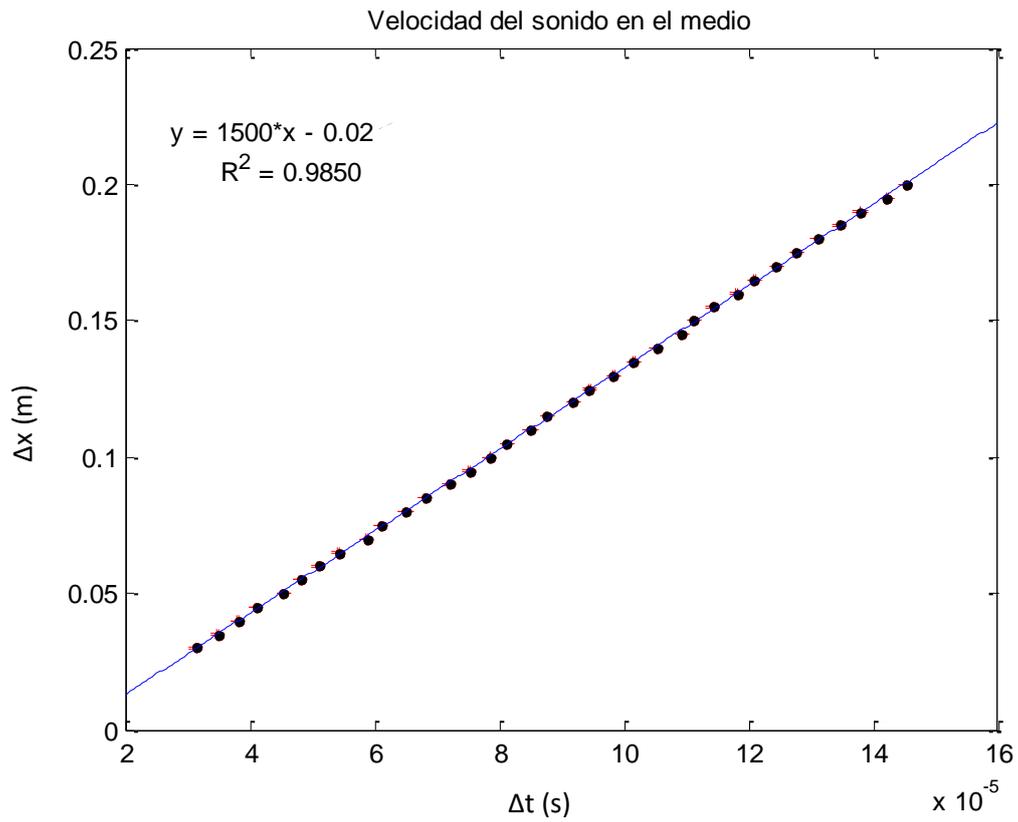


Figura 18: Velocidad del sonido en el medio

Tal y como se observa en la ecuación de la recta de ajuste, se obtiene una velocidad del sonido en el medio de  $c = 1500 \pm 3$  m/s.

Mediante la recta de ajuste, se obtiene la corrección que se aplicaría a los datos:

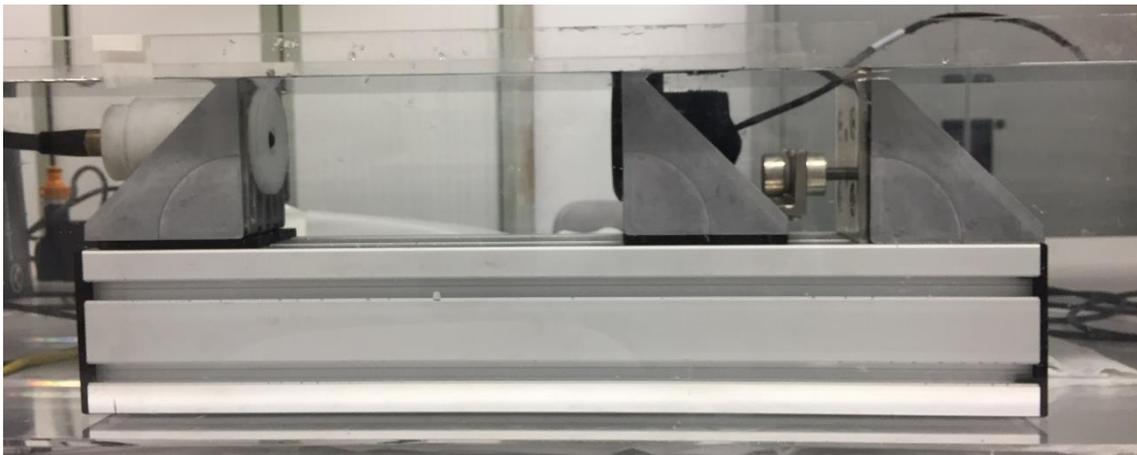
$$\frac{0.0172}{1500} = 1.14667E^{-05} \text{ (s)}$$

### 4.3. Montaje con un transductor y un hidrófono

El tercer montaje que se realiza es el formado por un transductor Airmar con una frecuencia de trabajo de 120kHz y un hidrófono TC4034, tal y como se observa en las siguientes imágenes:



*Figura 19: Montaje transductor-hidrófono*



*Figura 20: Montaje transductor-hidrófono*

Las medidas se realizan igual que en los anteriores montajes, variando la distancia entre el transductor y el hidrófono, de 3 a 20 cm con variaciones de 0,5 cm. La señal utilizada ha sido de tipo senoidal-Burst, 10Vpp (sin amplificador), 120kHz, 5 ciclos.

La temperatura del agua durante la calibración es de  $23,4 \pm 0,1$  °C, salinidad 0 PSU y profundidad de los transductores 0,025 metros. Mediante la fórmula de Medwin se obtiene una velocidad del sonido en el agua teórica de  $c = 1491,7 \pm 0,3$  m/s.

En la gráfica siguiente, se muestran los resultados del retardo de la señal según la distancia entre transductores, una vez se han adquirido los datos con Matlab, se les ha aplicado la autocorrelación y correlación cruzada, y se han restado los máximos.

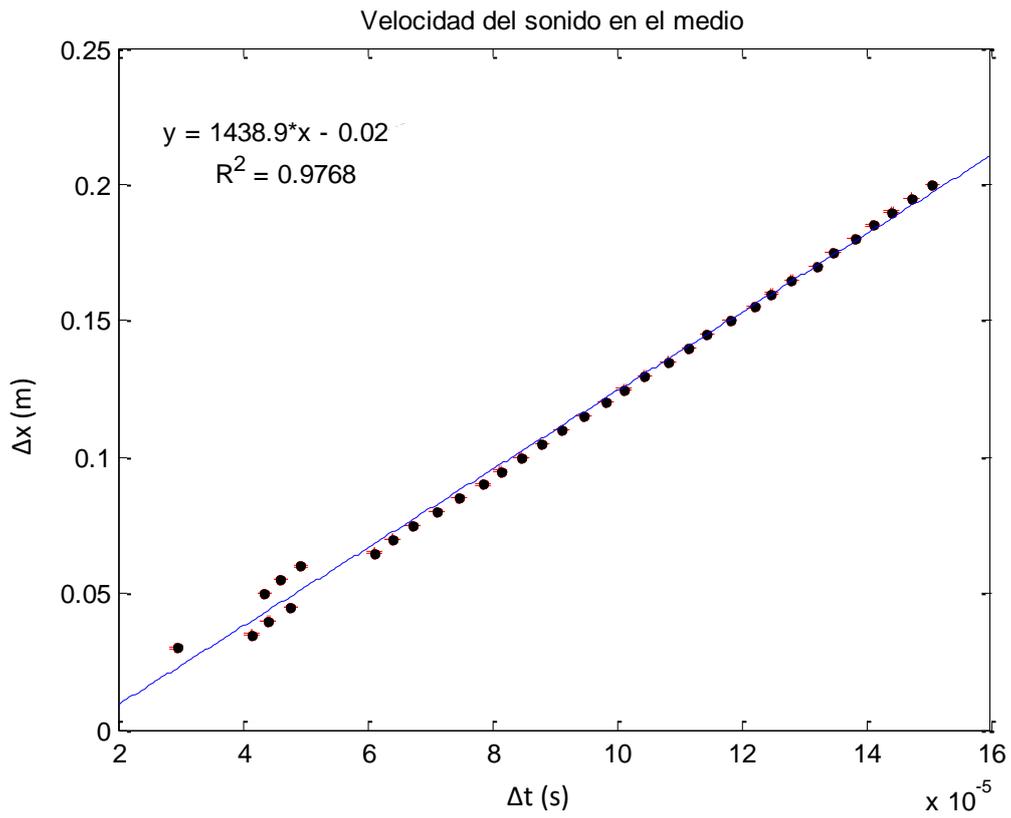


Figura 21: Velocidad del sonido en el medio

Tal y como se observa en la ecuación de la recta de ajuste, se obtiene una velocidad del sonido en el medio de  $c = 1439 \pm 17$  m/s.

Mediante la recta de ajuste, se obtiene la corrección que se aplicaría a los datos:

$$\frac{0.0197}{1438.9} = 1.3691E^{-05} \text{ (s)}$$

#### 4.4. Justificación del sistema de medida elegido

Por todo lo visto anteriormente en los montajes, se concluye que el sistema de medida elegido es el formado por 2 transductores iguales de frecuencia de trabajo 120kHz. Las razones de esta elección son:

- Los transductores tienen un factor de calidad Q bajo, por tanto, tendrán una respuesta más rápida y se obtendrán errores más bajos en las medidas.
- La frecuencia de trabajo de 120kHz es una de las más utilizadas en la caracterización de biomasa.
- Los transductores están diseñados para utilizarse en boyas satelitales para la pesca de atún en el mar, siendo 120kHz su frecuencia de trabajo típica.
- A su vez, la frecuencia de trabajo también es de las típicas con las que se trabaja en las ecosondas.
- Por último, se comprueba que con el montaje de 2 transductores iguales se ha obtenido la velocidad del sonido en el agua más parecida a la teórica,  $c = 1494 \pm 3$  m/s.

#### 4.5. Recalibración del sistema de medida

Una vez elegido el montaje más adecuado, debido al propio uso del sistema durante las mediciones, el cable del transductor en recepción se rompió. Ante la imposibilidad de soldarlo de forma inmediata se decidió utilizar a partir de ese momento un cable más corto, prescindiendo del cable alargador usado hasta el momento. Por ello, al cambiar la longitud del cable también cambia el tiempo de respuesta del transductor, por lo que hay que realizar una nueva calibración siguiendo el método utilizado desde un principio.

Dada la certeza del método utilizado para calibrar, y la falta de tiempo y necesidad de continuar con las mediciones, se decide variar la distancia entre transductores de 1 a 10 cm con variaciones de 1 cm. La señal utilizada ha sido de tipo senoidal-Burst, 10Vpp (sin amplificador), 120kHz, 5 ciclos.

La temperatura del agua durante la calibración es de  $25,1 \pm 0,1$  °C, salinidad 0 PSU y profundidad de los transductores 0,025 metros. Mediante la fórmula de Medwin se obtiene una velocidad del sonido en el agua teórica de  $c = 1496,5 \pm 0,3$  m/s.

En la gráfica siguiente, se muestran los resultados del retardo de la señal según la distancia entre transductores, una vez se han adquirido los datos con Matlab, se les ha aplicado la autocorrelación y correlación cruzada, y se han restado los máximos.

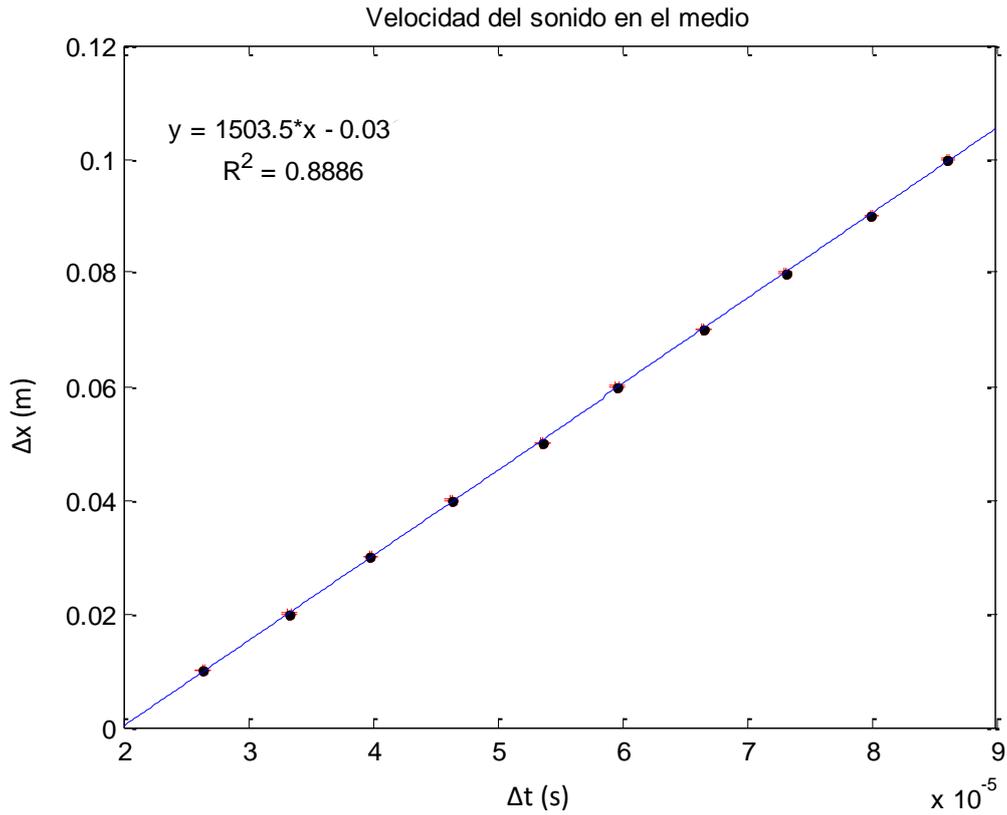


Figura 22: Velocidad del sonido en el medio

Tal y como se observa en la ecuación de la recta de ajuste, se obtiene una velocidad del sonido en el medio de  $c = 1503 \pm 6 \text{ m/s}$ .

Mediante la recta de ajuste, se obtiene la corrección que se aplicará a los datos:

$$\frac{0.0299}{1503.5} = 1.98869E^{-05} \text{ (s)}$$

## 5. Caracterización acústica

### 5.1. Medidas con caballa (*mackerel*)

#### 5.1.1. Medidas con tejido muscular

Antes de realizar medidas con atún listado, se procede a caracterizar la caballa al existir más estudios previos de esta especie, por lo que servirá para establecer un sistema de medida fiable. Se dispone de diversos ejemplares de caballa congelada, por lo que se utilizan diversos de ellos según sean necesarios para medir velocidad en el medio o densidad. Se corta en distintos trozos para ir superponiéndolos y así variar el grosor de la muestra y por tanto la longitud entre transductores. La señal utilizada ha sido de tipo senoidal, 800mVpp (con amplificador), 120kHz, 1 ciclo.

La colocación aproximada de las muestras se puede observar en las siguientes imágenes:



Figura 23: Tejido muscular de caballa



Figura 24: Tejido muscular de caballa

A continuación, se muestran los resultados obtenidos después del tratamiento de los datos.

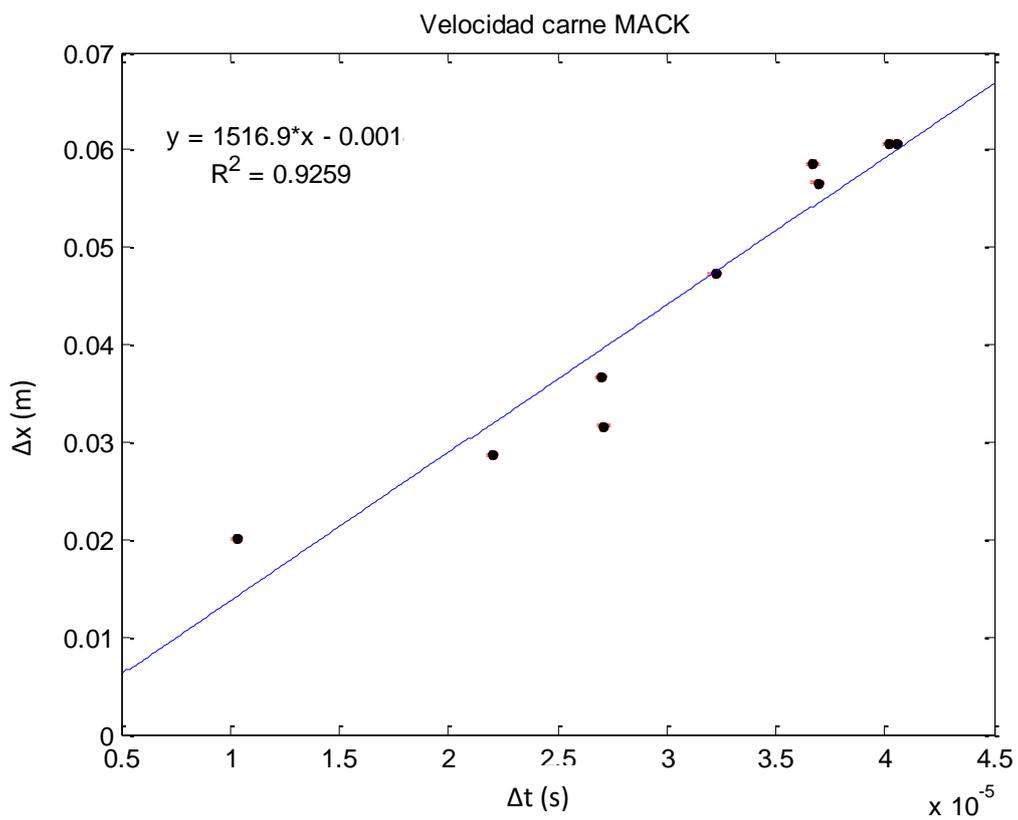


Figura 25: Velocidad del sonido en el medio

Se caracteriza la muestra de tejido muscular de caballa con la recta de ajuste con una velocidad  $c = 1520 \pm 160$  m/s.

### 5.1.2. Medidas con tejido óseo

Una vez realizadas las medidas con tejido muscular, se procede con las medidas con tejido óseo. Se limpia al máximo posible la espina para poder medir exclusivamente hueso sin trozos de tejido muscular, en este caso la señal utilizada ha sido de tipo senoidal, 800mVpp (con amplificador), 120kHz, 1 ciclo.

La colocación aproximada de la muestra se puede observar en la siguiente imagen:

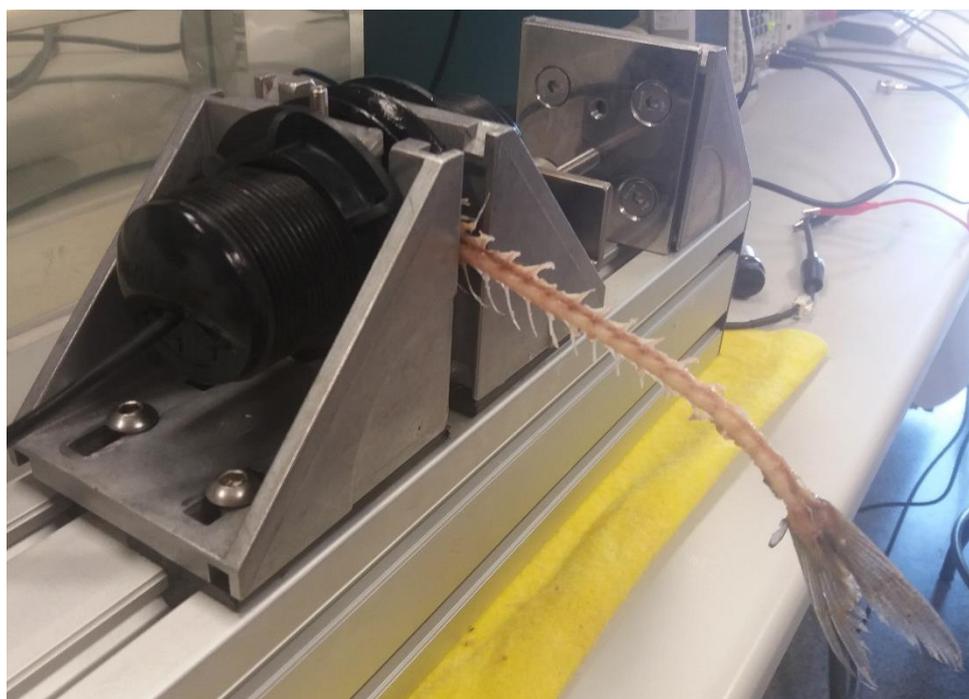


Figura 26: Tejido óseo de caballa

En esta ocasión, se realizan medidas con 1 muestra de tejido óseo consistente en un ejemplar de unos 20cm de longitud. Se efectúan numerosas medidas con el fin de poder hacer un tratamiento estadístico de los datos si fuera necesario.

A continuación, se muestran la velocidad media obtenida, la dispersión y el error de la muestra de espina:

	<b>Velocidad del sonido en el medio (m/s)</b>	<b>Dispersión (%)</b>	<b>Error</b>
<b>Muestra 1</b>	2370	43,28	130

Tabla 1: Velocidad del sonido tejido óseo caballa

Se caracteriza la muestra de espina de caballa con una velocidad  $c = 2370 \pm 130$  m/s.

## 5.2. Medidas con atún listado (*skipjack tuna*)

### 5.2.1. Medidas con tejido muscular

Después de haber realizado medidas con caballa, y haber obtenido resultados bastante razonables comparados con distintos estudios, se procede con las medidas con las muestras de túnido. Se dispone de 2 ejemplares de atún listado congelado, con distintos tipos de cortes (transversal y longitudinal). Se procede primero a descongelar el pez 1 y con él se realizan pruebas con el método de medida escogido. Posteriormente, se procede a descongelar el pez 2 y se realizan medidas de velocidad en aire si piel, dado que según las pruebas realizadas con el pez 1 se ha constatado que esta es la forma más fiable de caracterizar la carne. Se corta en distintos trozos para ir superponiéndolos y así variar el grosor de la muestra y por tanto la longitud entre transductores. La señal utilizada ha sido de tipo senoidal-Burst, 10Vpp (sin amplificador), 120kHz, 5 ciclos.

La colocación aproximada de las muestras se puede observar en las siguientes imágenes:

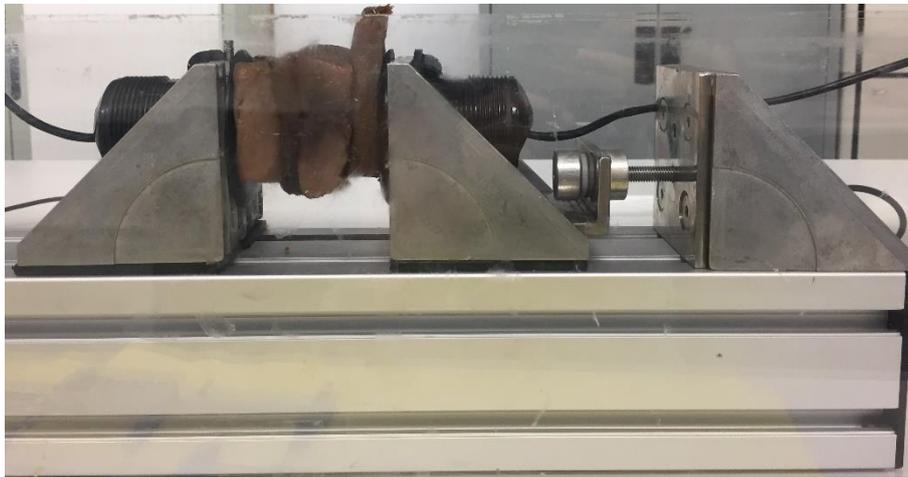


Figura 27: Tejido muscular de atún listado



Figura 28: Tejido muscular de atún listado

A continuación, se muestran los resultados obtenidos después del tratamiento de los datos. Se han realizado 3 medidas idénticas en cada muestra por tanto, para proceder con ellas se realiza la media aritmética de cada muestra.

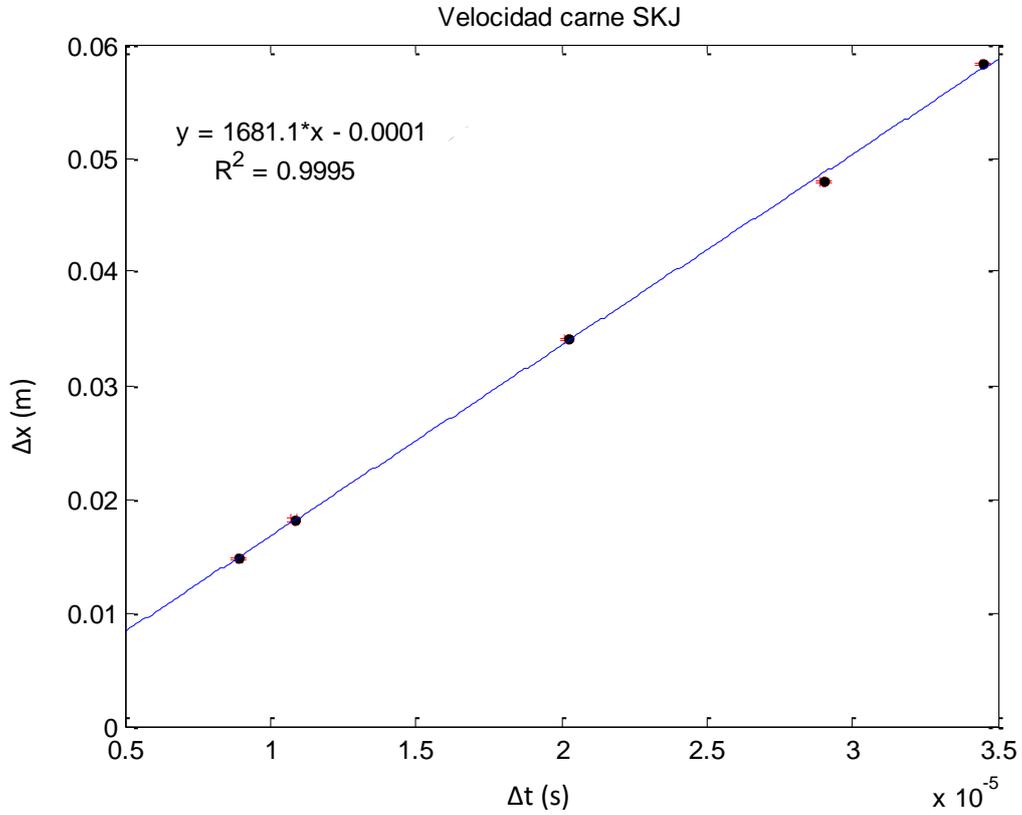


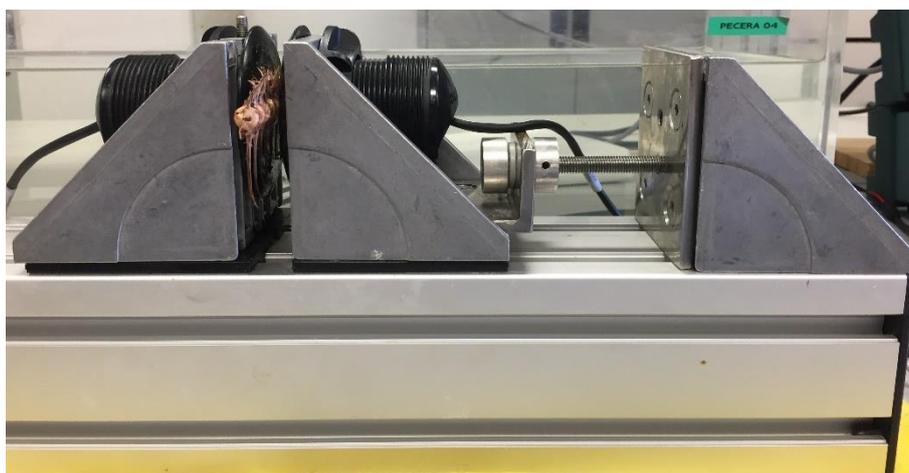
Figura 29: Velocidad del sonido en el medio

Se caracteriza la muestra de tejido muscular de túnido con la recta de ajuste con una velocidad  $c = 1681 \pm 11$  m/s.

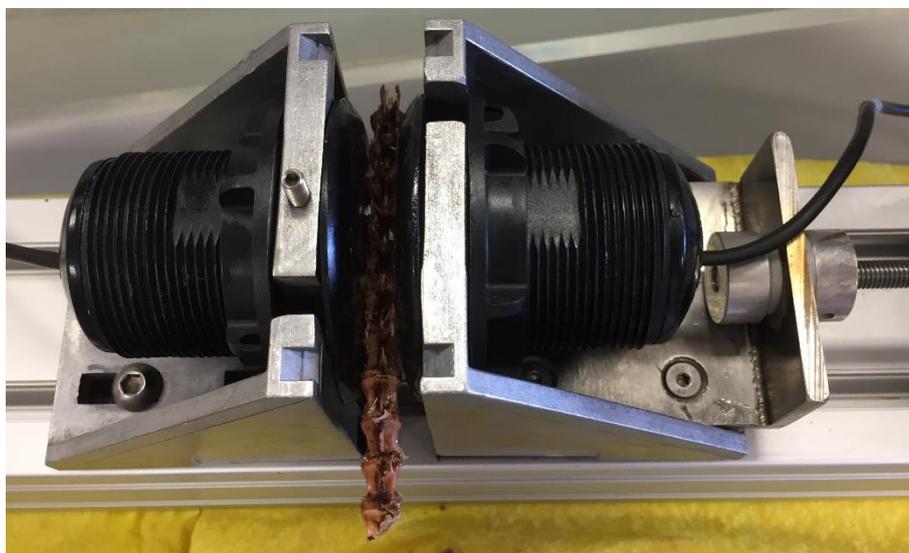
### 5.2.2. Medidas con tejido óseo

Una vez realizadas las medidas con tejido muscular, se procede con las medidas con distintas muestras de tejido óseo. Se limpian al máximo posible las espinas para poder medir exclusivamente hueso sin trozos de tejido muscular, en este caso la señal utilizada ha sido de tipo senoidal, 800mVpp (con amplificador), 120kHz, 1 ciclo.

La colocación aproximada de las muestras se puede observar en las siguientes imágenes:



*Figura 30: Tejido óseo de atún listado*



*Figura 31: Tejido óseo de atún listado*

En esta ocasión, se realizan medidas con 3 muestras de espinas consistentes en 3 trozos de distinta longitud de ambos ejemplares de atún listado disponibles. Al constatar que el tiempo transcurrido entre el corte de la muestra, limpieza y medida influye en los resultados, se decide tratar por separado los datos de las 3 muestras, así como realizar numerosas medidas con el fin de poder hacer un tratamiento estadístico de los datos si fuera necesario.

A continuación, se muestran la velocidad media obtenida, la dispersión y el error de las 3 muestras de espina:

	<b>Velocidad del sonido en el medio (m/s)</b>	<b>Dispersión (%)</b>	<b>Error</b>
<b>Muestra 1</b>	3130	16,08	130
<b>Muestra 2</b>	3470	12,83	70
<b>Muestra 3</b>	2570	36,01	140

*Tabla 2: Velocidad del sonido tejido óseo atún listado*

Se caracterizan las muestras de tejido óseo de túnido con las velocidades:

- Muestra 1:  $c = 3130 \pm 130$  m/s.
- Muestra 2:  $c = 3470 \pm 70$  m/s.
- Muestra 3:  $c = 2570 \pm 140$  m/s.

Tal y como se observa en la Tabla 2, se obtienen unas dispersiones altas en todos los casos. Al ser mayores al 12%, se debería realizar un tratamiento estadístico con un número grande de medidas para poder obtener resultados más concretos. En este caso, no se pudieron tomar una cantidad grande de medidas ya que, como se mencionó anteriormente, la muestra de espina se seca con el transcurso del tiempo y varían notablemente tanto las propiedades como los resultados obtenidos. Por ello, se propondrá como una línea de trabajo futura el aumento de medidas de la espina, así como el investigar la forma de mantener las propiedades de la muestra.

## 6. Densimetrías

### 6.1. Introducción

En el presente capítulo, se explicará el procedimiento de medida utilizado para el cálculo de las densidades de las muestras utilizadas durante el Trabajo Final de Máster (en adelante, TFM), así como los resultados obtenidos.

El cálculo de la densidad de las muestras se ha hecho en base al Principio de Arquímedes, que afirma que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso de fluido desalojado [10].

La densidad se define como el cociente entre la masa y el volumen de un cuerpo:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

### 6.2. Densidad de la caballa (*mackerel*)

Previamente a las medidas de densidad con túnidos, se realizan densimetrías con caballa para poder determinar una metodología a seguir con resultados fiables, ya que de dicho pez sí que existe documentación de mediciones previas. Por ello, se desarrollan unas primeras medidas de densidad de la caballa el 19 de junio de 2017 con muestras correspondientes a tejido muscular y tejido óseo, y se repiten las medidas con el tejido óseo el 21 de junio de 2017, para obtener finalmente un valor promedio.

A continuación, se muestran unas imágenes y los resultados de la muestra de tejido muscular:

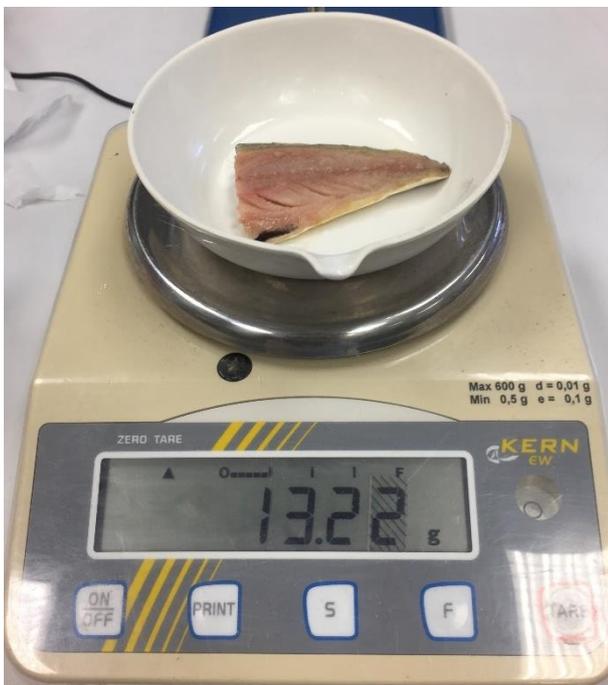


Figura 32: Medida masa tejido muscular caballa

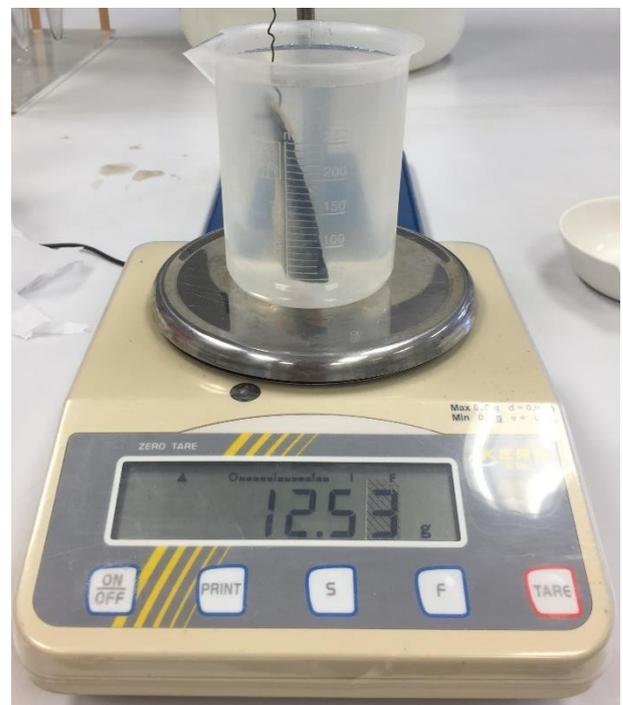


Figura 33: Medida volumen tejido muscular caballa

	Masa en aire (g)	Volumen en agua (ml)
<b>Medida 1</b>	13,46	12,34
<b>Medida 2</b>	13,22	12,53
<b>Medida 3</b>	13,02	12,29
<b>Media</b>	13,23	12,39
<b>Dispersión (%)</b>	3,32	1,94
<b>Medida 4</b>	12,81	12,16
<b>Medida 5</b>	12,77	12,11
<b>Medida 6</b>	12,76	12,12
<b>Total 6 medidas</b>		
<b>Media</b>	13,01	12,26
<b>Dispersión (%)</b>	5,38	3,43
<b>Error</b>	0,29	0,16

Tabla 3: Medidas densidad tejido muscular caballa

<b>Densidad <math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,06
<b>Error Total (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,04

En las 3 primeras medidas se obtiene una dispersión mayor al 2% en la masa en aire, por ello se repiten otras 3 medidas. Añadiendo las medidas 4-6 se obtiene una dispersión del 5,38% en aire y del 3,43% en agua, siendo suficiente con dichas 6 medidas ya que se obtiene una dispersión entre el 2% y el 8%. Por tanto, la densidad media será:

Densidad media tejido muscular caballa:  $\rho = 1,06 \pm 0,04$  (g/cm<sup>3</sup>)

A continuación, se muestran los resultados de la muestra de tejido óseo:

	Masa en aire (g)	Volumen en agua (ml)
<b>Medida 1</b>	1,05	0,96
<b>Medida 2</b>	1,05	0,96
<b>Medida 3</b>	1,05	0,96
<b>Media</b>	1,05	0,96
<b>Dispersión (%)</b>	0	0
<b>Error</b>	0,01	0,01

Tabla 4: Medidas densidad tejido óseo caballa

<b>Densidad <math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,09
<b>Error Total (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,02

Densidad media tejido óseo caballa:  $\rho = 1,09 \pm 0,02$  (g/cm<sup>3</sup>)

### 6.3. Densidad del atún listado (*skipjack tuna*)

Una vez establecida la metodología que se va a seguir en la densitometría, y con los resultados fiables obtenidos en la caballa, se procede a medir la densidad del túnido. Se disponen de diferentes muestras de pescado pertenecientes a 2 ejemplares distintos, por tanto, se realizan distintas densitometrías según se van descongelando los especímenes.

#### 6.3.1. Ejemplar 1

En cuanto a las mediciones de la densidad del ejemplar 1, la correspondiente a una muestra de tejido muscular se realizó el 21 de junio de 2017, y la correspondiente a una muestra de tejido óseo el 31 de julio de 2017.

A continuación, se muestran unas imágenes y los resultados de la muestra de tejido muscular:



Figura 34: Medida masa tejido muscular atún listado



Figura 35: Medida volumen tejido muscular atún listado

	Masa en aire (g)	Volumen en agua (ml)
<b>Medida 1</b>	51,96	47,72
<b>Medida 2</b>	51,82	47,77
<b>Medida 3</b>	51,80	47,76
<b>Media</b>	51,86	47,75
<b>Dispersión (%)</b>	0,31	0,10
<b>Error</b>	0,09	0,03

Tabla 5: Medidas densidad tejido muscular atún listado

<b>Densidad <math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,09
<b>Error Total (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,002

Densidad media tejido muscular atún listado:  $\rho = 1,09 \pm 0,002$  (g/cm<sup>3</sup>)

A continuación, se muestran unas imágenes y los resultados de la muestra de tejido óseo:



Figura 36: Medida masa tejido óseo atún listado

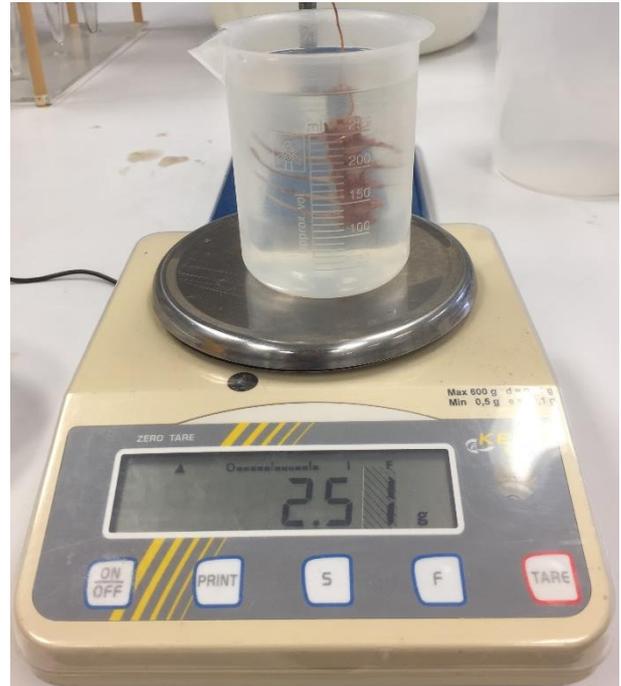


Figura 37: Medida volumen tejido óseo atún listado

	Masa en aire (g)	Volumen en agua (ml)
<b>Medida 1</b>	3,06	2,50
<b>Medida 2</b>	3,08	2,51
<b>Medida 3</b>	3,10	2,55
<b>Media</b>	3,08	2,52
<b>Dispersión (%)</b>	1,30	1,98
<b>Medida 4</b>	3,08	2,52
<b>Medida 5</b>	3,10	2,53
<b>Medida 6</b>	3,11	2,55
<b>Total 6 medidas</b>		
<b>Media</b>	3,10	2,53
<b>Dispersión (%)</b>	0,97	1,18
<b>Error</b>	0,02	0,02

Tabla 6: Medidas densidad tejido óseo atún listado

<b>Densidad <math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,22
<b>Error Total (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,02

Densidad media tejido óseo atún listado:  $\rho = 1,22 \pm 0,02$  (g/cm<sup>3</sup>)

### 6.3.2. Ejemplar 2

En cuanto a las mediciones de la densidad del ejemplar 2, la correspondiente a una muestra de tejido muscular se realizó el 28 de junio de 2017.

A continuación, se muestran unas imágenes y los resultados de la muestra de tejido muscular:



Figura 38: Medida masa tejido muscular atún listado



Figura 39: Medida volumen tejido muscular atún listado

	Masa en aire (g)	Volumen en agua (ml)
<b>Medida 1</b>	42,23	38,70
<b>Medida 2</b>	42,01	38,26
<b>Medida 3</b>	42,04	38,56
<b>Media</b>	42,09	38,51
<b>Dispersión (%)</b>	0,52	1,14
<b>Medida 4</b>	41,49	38,05
<b>Medida 5</b>	41,53	38,12
<b>Medida 6</b>	41,49	38,10
<b>Total 6 medidas</b>		
<b>Media</b>	41,50	38,09
<b>Dispersión (%)</b>	0,10	0,18
<b>Error</b>	0,02	0,04

Tabla 7: Medidas densidad tejido muscular atún listado

<b>Densidad <math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,09
<b>Error Total (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,02

Densidad media tejido muscular atún listado:  $\rho = 1,09 \pm 0,02$  (g/cm<sup>3</sup>)

## 7. Conclusiones y líneas de trabajo futuro

Los objetivos establecidos al principio del presente Trabajo Final de Máster (en adelante, TFM), se han cumplido mayoritariamente, teniendo como principal inconveniente ya nombrado, la falta de más especies de túnidos para caracterizar, lo cual se propondrá como trabajo futuro. Se ha logrado la caracterización acústica y densimétrica de la caballa y del atún listado con resultados satisfactorios, tal y como se detalla posteriormente.

En el caso de la caballa, comparando los resultados obtenidos con los de *Gorska et al. (2005)* [11] [12], se tiene:

	Resultados TFM	Resultados <i>Gorska et al.</i>
<b>Velocidad del sonido en tejido muscular (contraste)<sup>1</sup></b>	1,01	≈1,025
<b>Velocidad del sonido en tejido óseo (contraste)<sup>1</sup></b>	1,58	[1,3 – 2,0]
<b>Densidad del tejido muscular (contraste)<sup>2</sup></b>	1,03	[1,002 - 1,025]
<b>Densidad del tejido óseo (contraste)<sup>2</sup></b>	1,06	1,10 ± 0,05

Tabla 8: Comparativa resultados caballa

Se observa que la práctica totalidad de resultados obtenidos se encuentran dentro de los límites o muy cercanos a los referenciados, por lo que se validan dichos resultados, así como la metodología utilizada.

En el caso del atún listado, no existen estudios previos con los que poder comparar los resultados obtenidos como se ha hecho con la caballa, ya que el presente TFM es el primero en caracterizar el atún listado. Anteriormente, se han realizado otros estudios con distintas especies de túnidos, como el realizado por *Sigfusson et al. (2008)* [13] sobre la caracterización ultrasónica del atún blanco o bonito del norte (*Thunnus alalunga*), o el realizado por *Shibata (1970)* [14] sobre las reflexiones ultrasónicas de peces individuales. Dicho estudio, realizado en Japón a finales de la década de 1960, ofrece algunos datos sobre densidad y velocidad del sonido en tejidos musculares de distintas especies de túnidos. Aunque no son comparables directamente con los resultados del presente TFM, fundamentalmente porque se trata de especies diferentes, así como de una frecuencia de trabajo distinta (2MHz), sí puede considerarse como orientativo por la similitud de los resultados a pesar de trabajar con otras especies.

---

<sup>1</sup> La velocidad del sonido en contraste es el valor que se obtiene al dividir la velocidad del sonido en el medio entre la velocidad del sonido en el agua  $c = 1500$  m/s.

<sup>2</sup> La densidad en contraste es el valor que se obtiene al dividir la densidad medida entre la densidad del agua de mar  $\rho = 1,026$  g/cm<sup>3</sup>.

*Shibata* obtiene para la especie *Thunnus obesus* en tejido muscular una densidad  $\rho = 1,09$  ( $\text{g/cm}^3$ ) y una velocidad del sonido  $c = 1585$  ( $\text{m/s}$ ). En el presente trabajo se obtiene para la especie *Katsuwonus pelamis* en tejido muscular una densidad  $\rho = 1,09 \pm 0,02$  ( $\text{g/cm}^3$ ) y una velocidad del sonido  $c = 1681 \pm 11$  ( $\text{m/s}$ ). *Shibata* da un valor para el Skipjack de  $c = 1580$  ( $\text{m/s}$ ), pero es un único valor, medido a frecuencias más altas y que debe tomarse con cuidado, ya que valores tomados para otras especies en el mismo trabajo presentan una gran dispersión.

En cuanto a la respuesta acústica de los distintos tejidos, sabiendo que la impedancia característica de un material se define como  $Z_0 = \rho * c$ , se tiene:

	Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	Velocidad del sonido ( $\text{m/s}$ )	Impedancia característica $Z_0$ (Rayls)
Tejido muscular caballa	1060	1520	$1611200 = 1,6 * 10^6$
Tejido óseo caballa	1090	2370	$2583300 = 2,6 * 10^6$
Tejido muscular atún listado	1090	1681	$1832290 = 1,8 * 10^6$
Tejido óseo atún listado (muestra 2)	1220	3470	$4233400 = 4,2 * 10^6$

Tabla 9: Impedancia característica

Se observa que tanto para el tejido muscular como para el tejido óseo, la impedancia característica del atún listado es mayor que la de la caballa,  $Z_{SKJ} > Z_{MACK}$ . Por tanto, al tener el atún listado una mayor impedancia característica, sus tejidos opondrán más resistencia a que las ondas se propaguen sobre ellos, es decir, el atún listado producirá una mayor energía retrodispersada (*backscattering*) que la caballa.

En cuanto a las líneas de trabajo futuro que se podrían tratar se tiene:

- Caracterización acústica y densimétrica de un mayor número de especies de túnidos.
- Estudiar la variación de la densidad,  $\rho$ , y la velocidad del sonido,  $c$ , dentro de la misma especie según la edad y el contenido en grasa de los ejemplares.
- Aumento de medidas y mejora de la adquisición de las mismas en la caracterización de la espina del atún listado, con el fin de obtener resultados más precisos.
- Mejora del sistema de adquisición osciloscopio-Matlab, con la intención de toma de datos en tiempo real.
- Utilización de otras señales en emisión, como por ejemplo un *Sweep*, que es un barrido frecuencial en el tiempo desde una frecuencia inicial dada a una frecuencia final determinada.
- Simulación numérica de los resultados.

## 8. Bibliografía

- [1] Wikipedia. *Thunnus*. <<https://es.wikipedia.org/wiki/Thunnus>> [Consulta: 8 de septiembre de 2017].
- [2] Wikipedia. *Pielago*. <<https://es.wikipedia.org/wiki/Pi%C3%A9lago>> [Consulta: 8 de septiembre de 2017].
- [3] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). *Capturas nominales mundiales del atún*. <<http://www.fao.org/fishery/statistics/tuna-catches/es>> [Consulta: 8 de septiembre de 2017].
- [4] Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN). *The IUCN Red List of Threatened Species*. <<http://www.iucnredlist.org/>> [Consulta: 8 de septiembre de 2017].
- [5] Pérez Arjona, Isabel. Acústica Submarina curso 2016-2017. “*Tema 4: Aplicaciones de la Acústica Submarina (I)*”.
- [6] Pérez Arjona, Isabel. Acústica Submarina curso 2016-2017. “*Tema 2: Reflexión y dispersión: superficies y objetos. Ecuación del SONAR activo*”.
- [7] KINSLER, L. E. et al. (2000). *Fundamentals of Acoustics*, 4th ed. United States of America: Publication Services, Inc.
- [8] Pérez Arjona, Isabel. Fundamentos Físicos. “*Práctica 1: Tratamiento de imprecisiones sistemáticas y accidentales*”.
- [9] LURTON, X. (2002). *An introduction to underwater acoustics: principles and applications*. Springer.
- [10] Reed, B. C. (2004). Archimedes’ law sets a good energy-minimization example. *Physics Education*, 39 (4) July 2004, pp. 322-323.
- [11] Gorska, N., Ona, E., y Korneliussen, R. (2005). Acoustic backscattering by Atlantic mackerel as being representative of fish that lack a swimbladder. Backscattering by individual fish. *ICES Journal of Marine Science*, 62, 984-995.
- [12] Sigfusson, H., Decker, E.A., y McClements, D.J. (2001). Ultrasonic characterization of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*). *Food Research International*, 34, 15-23.
- [13] Sigfusson, H., Decker, E.A., Morrissey, M., y McClements, D.J. (2008). Ultrasonic Characterization of North Pacific Albacore (*Thunnus alalonga*). *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 10:3, 5-20.
- [14] Shibata, K. (1970). Study on Details of Ultrasonic Reflection from Individual Fish. *Bulletin of the Faculty of Fisheries, Nagasaki University*, Nº 29.

## Lista de figuras

Figura 1: Generador de funciones.....	5
Figura 2: Osciloscopio.....	5
Figura 3: Amplificador .....	6
Figura 4: Pecera.....	6
Figura 5: Soporte aluminio .....	6
Figura 6: Transductor Airmar .....	7
Figura 7: Hidrófono .....	7
Figura 8: Montaje .....	8
Figura 9: Montaje .....	8
Figura 10: Báscula de precisión.....	9
Figura 11: Conexión Matlab .....	10
Figura 12: Diferencia de tiempos de llegada.....	11
Figura 13: Montaje dos transductores iguales.....	12
Figura 14: Montaje dos transductores iguales.....	12
Figura 15: Velocidad del sonido en el medio .....	13
Figura 16: Montaje dos transductores distintos .....	14
Figura 17: Montaje dos transductores distintos .....	14
Figura 18: Velocidad del sonido en el medio .....	15
Figura 19: Montaje transductor-hidrófono.....	16
Figura 20: Montaje transductor-hidrófono.....	16
Figura 21: Velocidad del sonido en el medio .....	17
Figura 22: Velocidad del sonido en el medio .....	19
Figura 23: Tejido muscular de caballa.....	20
Figura 24: Tejido muscular de caballa.....	21
Figura 25: Velocidad del sonido en el medio .....	21
Figura 26: Tejido óseo de caballa .....	22
Figura 27: Tejido muscular de atún listado .....	23
Figura 28: Tejido muscular de atún listado .....	23
Figura 29: Velocidad del sonido en el medio .....	24
Figura 30: Tejido óseo de atún listado .....	25
Figura 31: Tejido óseo de atún listado .....	25
Figura 32: Medida masa tejido muscular caballa.....	27
Figura 33: Medida volumen tejido muscular caballa .....	27
Figura 34: Medida masa tejido muscular atún listado.....	29
Figura 35: Medida volumen tejido muscular atún listado .....	29
Figura 36: Medida masa tejido óseo atún listado .....	30
Figura 37: Medida volumen tejido óseo atún listado .....	30
Figura 38: Medida masa tejido muscular atún listado.....	31
Figura 39: Medida volumen tejido muscular atún listado .....	31

## Lista de tablas

Tabla 1: Velocidad del sonido tejido óseo caballa .....	22
Tabla 2: Velocidad del sonido tejido óseo atún listado .....	26
Tabla 3: Medidas densidad tejido muscular caballa .....	28
Tabla 4: Medidas densidad tejido óseo caballa .....	28
Tabla 5: Medidas densidad tejido muscular atún listado .....	29
Tabla 6: Medidas densidad tejido óseo atún listado .....	30
Tabla 7: Medidas densidad tejido muscular atún listado .....	31
Tabla 8: Comparativa resultados caballa .....	32
Tabla 9: Impedancia característica.....	33

## Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecerle a mi tutora Isabel y a Víctor, que ha ejercido como cotutor, la confianza depositada en mí para realizar este trabajo, así como toda la ayuda que me han prestado. Gracias por hacerme aprender día a día cosas nuevas e iniciarme en el mundo de la investigación.

A los profesores y en especial al director del Máster en Ingeniería Acústica, da gusto encontrarse con personas tan profesionales y comprometidas desde el principio, gracias por todo lo aprendido. También me gustaría acordarme de todos los compañeros del máster, ha sido corto pero intenso y lo habéis hecho mucho más ameno, muchas gracias a todos.

Agradecer también la ayuda siempre que hizo falta de los técnicos de laboratorio Álex y Javier, y a mis compañeros en el laboratorio durante estos meses por haber compartido tantas horas y que se hayan pasado volando, gracias por vuestra ayuda en todo momento y por hacer los almuerzos, comidas y meriendas más divertidas.

A mis padres por seguir apostando por mí reto tras reto, lo mejor está por venir, os quiero.

A Alejandro por el apoyo para superar otra etapa juntos, lo más lejos a tu lado.

A mis queridas hermanas Forner, Isa y Anna, por resolverme tantas dudas y darme tanto apoyo en la distancia, la resistencia siempre estará presente estemos donde estemos.

¡Gracias!