

**UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA**

**Master en Eval. Amb. Ecosistemas marinos y Cost.**

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

**CARACTERIZACIÓN DE  
HIDRÓFONOS DE BAJO COSTE Y  
SU APLICACIÓN EN ESTUDIOS  
BIOACÚSTICOS**

***TRABAJO FINAL DE MASTER***

Autora:

**Desirée Luna Fernández**

Tutora:

**Isabel Péres Arjona**

**GANDIA, 2015**

## RESUMEN

La capacidad de los cetáceos de cazar o de evitar obstáculos, a través de la llamada ecolocalización, genera un gran interés ya que el estudio de su mecanismo puede llevar a grandes avances en los sonares humanos. Las burbujas de aire en el agua son conocidas pantallas acústicas que impiden el paso de ondas sonoras, sin embargo, determinadas especies de odontocetos han conseguido desarrollar mecanismos de ecolocalización capaces de atravesar estas pantallas. En este trabajo se presenta un diseño experimental que permita evaluar la capacidad de ecolocalización de la beluga (*Delphinapterus leuca*) tras pantallas de burbujas. Para ello se ha realizado un estudio de sensibilidad de varios hidrófonos y se ha calibrado un hidrófono de bajo coste para su utilización en estudios cualitativos con cetáceos. El sistema experimental ha sido construido en las instalaciones del IGIC en Gandía. En un futuro, se utilizará para llevar a cabo el diseño experimental en las instalaciones de L'Ocenogràfic. Actualmente no se han podido realizar las medias ya que la hembra, quien es el sujeto de dicho experimento, está actualmente preñada.

*PALABRAS CLAVES: Ecolocalización, Acústica, Pulsos, Burbujas, Belugas.*

## ABSTRACT

The ability of whales to hunt or avoid obstacles, through the so-called echolocation, is very attractive because the study of this mechanism can lead to breakthroughs in human sonar. Air bubbles in the water are known to be a barrier that prevents the passage of sound waves. However, certain species of toothed whales have succeeded in developing mechanisms capable of echolocation through these bubbles screens. This paper presents an experimental design to assess the ability of echolocation of beluga (*Delphinapterus leuca*) after bubble screens. For this purpose it has been performed a sensitivity of several hydrophones and it has been calibrated a low cost hydrophone for use in qualitative studies cetaceans. The experimental system has been built on the premises of IGIC in Gandia. In the future, it will be used to carry out the experimental design facilities L'Ocenografic. Currently it has not been able to make the averages because the female, who is the aim of this experiment, is currently pregnant.

*KEY WORDS: Echolocation, Acoustic, Pulses, Bubbles, Belugas.*



## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. <b>Conceptos básicos de la acústica</b> .....	3
1.2. <b>Bioacústica marina</b> .....	9
1.3. <b>Ecolocalización</b> .....	10
<b>2. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	18
2.1. <b>Materiales utilizados</b> .....	18
2.2. <b>Métodos</b> .....	25
2.2.3. <b>Diseño y construcción del sistema experimental</b> .....	27
<b>3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES</b> .....	30
<b>4. DISCUSIÓN</b> .....	33
<b>5. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	34

## 1. INTRODUCCIÓN

La propagación de ondas electromagnéticas (luz) en el medio marino resulta muy poco eficiente, de forma que la luz se absorbe en pocos metros de profundidad. La propagación de ondas acústicas, en cambio, es particularmente eficiente en este medio, donde la velocidad de propagación del sonido es cinco veces mayor que en el aire y la absorción menor. Las especies acuáticas están adaptadas a este medio “acústico” y muchas de ellas han desarrollado capacidades desde el punto de vista de emisores o receptores. La acústica pasiva nos permite estudiar los sonidos que se generan en un ecosistema y monitorizar el mismo con herramientas acústicas, pudiendo así ayudarnos a entender muchos de los comportamientos de las especies que en ellos habitan.

La finalidad de este trabajo es el diseño experimental y construcción un dispositivo experimental para realizar un estudio sobre las capacidades de ecolocalización de las belugas (*Delphinapterus leuca*) ante la presencia de burbujas de aire (conocidas como pantallas acústicas), que se llevará a cabo en los tanques de l’Oceanogràfic.

Desde la antigüedad, los seres humanos se han sentido interesados por el comportamiento social y la aparente curiosidad que poseen los cetáceos. Aunque las primeras investigaciones sobre estos animales fueron impulsadas por intereses económicos en la industria ballenera, al conocer que los cetáceos son mamíferos marinos, y que son una parte clave en los ecosistemas marinos, cambiaron los impulsos científicos y en la actualidad las investigaciones se realizan, en su mayoría, para apoyar su conservación y protección (Zimmer, 2011), ya que están siendo potencialmente amenazados.

Aunque los cetáceos se encuentran en todos los océanos y casi todos los mares (Rus Hoelzel, 2002), al pasar toda su vida en estos medios acuáticos, su estudio supone un reto para la comunidad científica, ya que es un hábitat hostil en el que es difícil trabajar. Estos mamíferos marinos han ido adaptando su forma de interactuar entre sí y con el medio, generando sonidos y adaptando sus sistemas auditivos al entorno acuático, estando así la acústica siempre presente en su vida diaria (Zimmer, 2011). Un ejemplo de esta adaptación es la ecolocalización que poseen los cetáceos odontocetos (lo que comúnmente conocemos como delfines, belugas u orcas), permite a estos animales



orientarse y detectar obstáculos o presas, incluso en ausencia de contacto visual, y cuyas principales referencias se revisan en este trabajo.

Para evaluar la adecuación de los hidrófonos que debían utilizarse se realizó un ensayo previo emitiendo grabaciones correspondientes a belugas en libertad con un prototipo de altavoz submarino y registrándolas con distintos hidrófonos, simultáneamente a los sonidos emitidos por las belugas en L'Oceanogràfic.

## 1.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA ACÚSTICA

En nuestro día a día podemos observar muchos procesos que se repiten de una forma cíclica en un intervalo de tiempo determinado, por ejemplo el péndulo de un reloj en movimiento, una persona balanceándose en una mecedora, la traslación planetaria, etc. Todos ellos son movimientos periódicos, los cuales se caracterizan por su período (T) en el caso de que estemos hablando del tiempo que tarda en sucederse un ciclo completo; o por su frecuencia (f) si hablamos del número de ciclos que se dan por unidad de tiempo.

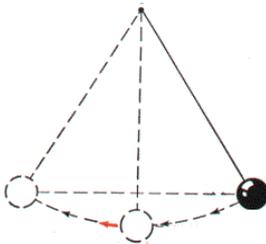


Figura 1: Movimiento oscilatorio

Hay diferentes tipos de movimientos periódicos, como es aquel en el que el cuerpo oscila alrededor de una posición de equilibrio estable (el caso del péndulo del reloj), el cual se denomina como movimiento oscilatorio. Si este movimiento, además, produce una transmisión de energía en el espacio, es decir, se produce la propagación de una perturbación en un punto a través de un medio, es conocido como movimiento ondulatorio u onda. Por ejemplo, si colocamos juntos dos muñecos con peso en la base, anclados a una mesa, y empujamos uno de ellos en dirección al otro muñeco, este también se moverá cuando el primero le empuje. Se produce, por tanto, una transmisión de energía (perturbación), pero no un transporte de materia, ya que cada muñeco regresa a la misma posición gracias al peso.

Hay diferentes tipos de movimientos periódicos, como es aquel en el que el cuerpo oscila alrededor de una posición de equilibrio estable (el caso del péndulo del reloj), el cual se denomina como movimiento oscilatorio. Si este movimiento, además, produce una transmisión de energía en el espacio, es decir, se produce la propagación de una perturbación en un punto a través de un medio, es conocido como movimiento ondulatorio u onda. Por ejemplo, si colocamos juntos dos muñecos con peso en la base, anclados a una mesa, y empujamos uno de ellos en dirección al otro muñeco, este también se moverá cuando el primero le empuje. Se produce, por tanto, una transmisión de energía (perturbación), pero no un transporte de materia, ya que cada muñeco regresa a la misma posición gracias al peso.

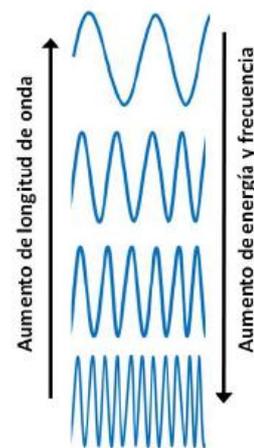


Figura 2: Diferentes ondas armónicas

Cuando esta onda posee una frecuencia (f) y una longitud de onda ( $\lambda$ ) (distancia recorrida por la onda mientras una partícula realiza una oscilación completa) definidas y constantes, se llama onda armónica.

Si la energía propagada, es decir, la perturbación, afecta tanto al campo magnético como al eléctrico, se conocen como ondas electromagnéticas, por ejemplo las microondas Si afecta al movimiento de los elementos de un medio (las ondas que se producen cuando dejamos caer una gota de agua en un vaso lleno), se conocen como ondas mecánicas, por ejemplo las ondas sísmicas de los terremotos. Si estas ondas mecánicas producen que las partículas tengan el movimiento de oscilación en paralelo a la dirección de propagación, como el que se produce cuando movemos un muelle, se denominan ondas

longitudinales, ondas de presión u ondas de compresión; sin embargo, si el movimiento de oscilación es perpendicular a la dirección de propagación, como el que se produce cuando batimos una cuerda, se denominan ondas transversales.

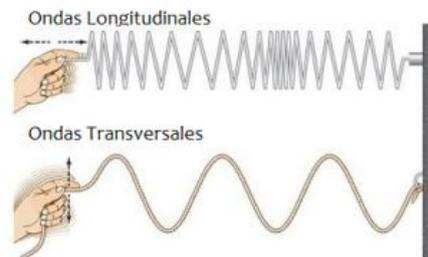


Figura 3: Ondas longitudinales y ondas transversales

A diferencia de las ondas mecánicas en las que se produce un desplazamiento perceptible de masa (cuando batimos una cuerda, sus secciones se mueven), cuando las ondas mecánicas producen movimientos muy pequeños en el medio se denominan ondas acústicas (u ondas de sonido), y son generadas mediante una fuente de sonido que producen vibraciones de pequeña amplitud. En los fluidos (como el agua), el sonido es transmitido como una onda longitudinal que provoca a su paso la aproximación y alejamiento de las partículas (compresión y expansión) en la dirección de avance de la onda, gracias a la compresibilidad (elasticidad) de este medio..

El avance de la perturbación por el medio provoca el movimiento de las partículas alrededor de su posición de equilibrio. Cuando un conjunto partículas contiguas unas de otras están realizando exactamente el mismo movimiento debido a la onda decimos que se encuentran en la misma fase y forman un frente de onda. Existen las ondas planas,



Imagen 1: Onda plana

que son aquellas que se mueven en una sola dirección desde el punto de origen y cuyos frentes de ondas son planos paralelos entre sí, con una amplitud constante. Serian las ondas descritas por el muelle o por la cuerda. Sin embargo cuando se forman círculos concéntricos al dejar caer una gota de agua en un vaso lleno,

tenemos diferentes frentes de ondas, ya que las partículas



Imagen 2: Onda esférica

que los forman se encuentran todas en la misma fase describiendo la superficie de una esfera, la cual se desplaza por todas las direcciones desde el punto de origen, en este caso las ondas que se forman se denominan ondas esféricas.

### **1.1.1. RESPUESTA DE LAS ONDAS ACÚSTICAS ANTE UN OBSTÁCULO FÍSICO. BURBUJAS DE AIRE**

Se entiende por obstáculo físico, una superficie límite de dos medios de distintas propiedades (entre el agua y el aire, el agua y un pez, el agua y el fondo...), o de un mismo medio con características no homogéneas (dos masas de agua con diferencias de temperatura y densidad).

Cuando la onda llega a un obstáculo físico, parte de ella continuará su trayecto a través de este obstáculo (refracción), otra parte rebotará de nuevo hacia la columna de agua (reflexión) y una tercera parte se disipará.

Todos los medios presentan una determinada resistencia al paso de la onda, denominada impedancia acústica. Esta propiedad es la que determina la cantidad de energía acústica que pasa de un medio a otro en el proceso de refracción (y, por tanto, la cantidad que es reflejada). La impedancia depende de la densidad del medio (cuanto mayor sea, más impedancia presenta) y de la elasticidad (cuanto más rígido, mayor impedancia). Cuanto más similares sean las impedancias de los medios, mayor energía acústica pasará, por lo que si nos encontramos con dos medios cuyas impedancias sean prácticamente similares (agua-arena), la onda se transmitirá casi en su totalidad. Mientras que si las impedancias son muy diferentes (agua-aire), la onda sufrirá una gran reflexión, y casi no llegará a cambiar de medio.

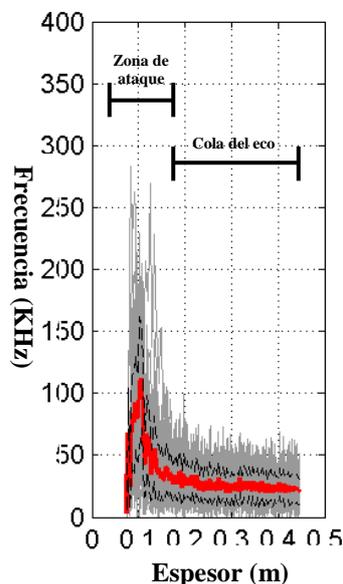
Centrándonos en el caso del agua y el aire, donde las impedancias de ambos difieren mucho, tenemos que cuando la onda avanza por la columna de agua y se encuentra con un obstáculo de aire, como son las burbujas, esta será reflejada en diferentes direcciones (dado que cada parte de la onda tiene un ángulo de incidencia diferente sobre el obstáculo, y que este posee una superficie irregular) casi en su totalidad, siendo una mínima parte refractada.

En varios estudios realizados en la Segunda Guerra Mundial, en el que se utilizaban cortinas de burbujas de aire como barrera acústica ante sonares de submarinos enemigos, se demostró que la presión de una onda ante burbujas de aire se puede reducir aproximadamente en un 90%, reduciéndose, por tanto, de forma considerable su velocidad y atenuándose prácticamente de una forma total (Domenico, 1982)

Por lo que dejando los efectos de refracción a un lado por ser casi inapreciables, estudiaremos la reflexión que ocurre al incidir una onda sobre una burbuja.

Cuando la onda alcanza una burbuja de aire, parte de la misma es reflejada y es devuelta al punto de origen, es decir, al transductor (Ver apartado de Material y métodos), el cual transforma la energía en una señal eléctrica. De que cada frente de onda enviado hacia el obstáculo, llegan al transductor varias señales denominadas pings, el conjunto de estas señales recibidas se conoce como eco.

La forma de un eco es bastante característica, ya que está formada por dos secciones principales: un pico de intensidad inicial, denominado área de ataque y el cual es debido al rebote especular de la onda; y un área de intensidades en descenso, denominada cola y la cual es debida a los rebotes oblicuos que vuelven al transductor.



*Figura 4: detección de una nube de burbujas de unos 10-20 cm de espesor cerca del casco del ferri Norröna, en el que instaló un Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) para realizar un estudio sobre la circulación meridional oceánica de las aguas cálidas del Atlántico Norte a los mares nórdicos a través del canal Faroe-Shetland (FSC)(Rossby & Flagg, 2012)*

Las partes de la onda que no alcanzan el transductor continúan su camino por la columna de agua, rebotando contra la superficie del agua y contra el fondo, volviendo así hacia las burbujas y sufriendo lo mismo que cuando la onda fue emitida directamente por el transductor. La parte que llega al transductor en este segundo rebote, se conoce como segundo eco.

El proceso de reflexión producido por las burbujas y posteriormente por la superficie y el fondo, se replica hasta que la energía de la onda sufre tal atenuación que no es capaz de distinguirse del ruido ambiente.

### 1.1.2. DEFINICIONES BÁSICAS DE LA ACÚSTICA

**Amplitud (A):** también denominada *cresta*, es la posición de máximo desplazamiento del elemento desde su posición de equilibrio.

**Longitud de onda ( $\lambda$ ):** es la distancia entre dos crestas. En general, es la distancia mínima entre dos puntos idénticos de la onda.

**Período (T):** tiempo que tarda en sucederse un ciclo completo, es decir, el intervalo de tiempo que tarda la onda en recorrer una longitud de onda.

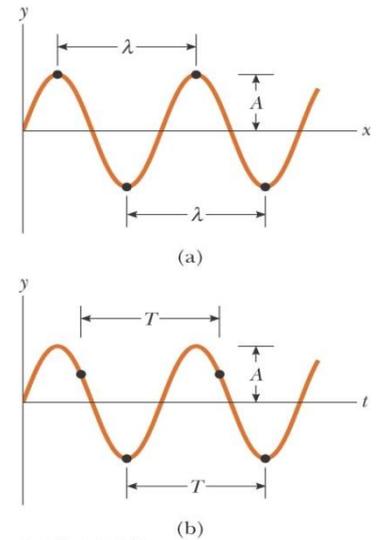


Figura 5: representación de la amplitud, la longitud de onda y el periodo.

**Frecuencia (f):** número de ciclos que se dan por unidad de tiempo, es decir, el número de crestas que pasan por un punto dado por unidad de tiempo. Como intervalo de tiempo se toma 1 segundo.

Relación entre el periodo y la frecuencia:

$$f = 1/T$$

Si el intervalo temporal es 1s, la unidad de  $f$  es  $s^{-1}$ , lo que se conoce como hercio (Hz).

**Velocidad de propagación (v):** velocidad de desplazamiento de las ondas, la cual depende de las propiedades del medio perturbado.

Relación entre la frecuencia, la longitud de onda y la velocidad de propagación:

$$\lambda = v/f$$

Si en lugar de la frecuencia utilizamos el periodo la ecuación sería:

$$v = \lambda / T$$

**Presión acústica (Pa):** diferencia de la presión producida por la perturbación y la presión en el equilibrio.

**Impedancia (z):** resistencia del medio a las perturbaciones de las ondas que se propagan sobre él. Depende de la presión acústica (p) y la velocidad de propagación (v).

$$z = Pa/v$$

*Intensidad acústica* (I): depende de la presión acústica y de la impedancia.

$$\mathbf{I} = \mathbf{P_{ef}}^2/\mathbf{z}$$

Donde  $P_{ef}$  es la presión promedio de un ciclo y depende de la presión de referencia ( $P_0$ ).

$$\mathbf{P_{ef}} = \mathbf{P_0}/\sqrt{2}$$

*Nivel de intensidad* (dB): dado que con la ecuación de la intensidad los valores se tornan a cantidades muy pequeñas, con las que no es muy cómodo trabajar, se introduce la escala decibélica, que se basa en los logaritmos de las intensidades relativas a una intensidad de referencia.

$$\mathbf{LI} = \mathbf{10log(I/I_{ref})}$$

*Potencia* (w): es la rapidez con la que se transfiere la energía. Es proporcional al cuadrado de la frecuencia, al cuadrado de la amplitud y a la velocidad de la onda. intensidad por superficie (S).

$$\mathbf{w} = \mathbf{I*S}$$

*Absorción* ( $\beta$ ): se producen procesos de atenuación debido a la absorción viscosa y relajación química.

Esta breve introducción a las magnitudes básicas utilizadas en la acústica submarina ayudará, entre otras cosas, a una fácil comprensión de uno de los comportamientos de los cetáceos más importantes en este estudio, la ecolocalización.



## 1.2. **BIOACÚSTICA MARINA**

Cuando se utiliza la acústica para estudiar las capacidades auditivas, la producción de sonido, las comunicaciones y diferentes comportamientos de animales marinos hablamos de biocústica marina.

Como se ha mencionado con anterioridad, la energía acústica se propaga en el agua de una forma más eficiente que casi cualquier otra forma de energía, ya que no sufre apenas atenuación en este medio, por lo que para diferentes especies acuáticas, el método más eficaz para comunicarse, navegar, evitar obstáculos o cazar, es mediante el uso de la acústica, ya sea de una forma activa (ecolocalización) o pasiva. Todos los sonidos, independientemente de su naturaleza, transmiten información que puede ser utilizada por los animales en su día a día. Algunos sonidos, por ejemplo, son utilizados por las especies como advertencia de peligro o amenaza que puedan darse en el entorno, otros pueden ser utilizados en la época de celo ante una hembra o entre los diferentes machos como advertencia a la hora de marcar territorio (Au & Hastings, 2008)

Del mismo modo, la ubicación de las especies, sus movimientos, las diferentes interacciones sociales, la densidad de una comunidad y demás facetas, pueden ser estudiadas mediante el uso de técnicas acústicas. Los sonares activos, por ejemplo, se están utilizando cada vez más en la detección y localización de bancos de peces, así como para la estimación de su densidad y distribución de tamaños, con el fin de ayudar a la pesca en una mejor gestión de los recursos. Los sonares activos también son utilizados para el estudio tanto de animales de tamaño muy reducido, como es el zooplancton, hasta los mamíferos marinos más grandes (los cuales también son estudiados con sonares pasivos) (Au & Hastings, 2008)

En los últimos años, debido al gran incremento de la actividad humana en el mar, ya sea por placer, investigación o interés económico, se ha producido un aumento considerable en la producción de ruido en este medio, aumentando el interés por el cómo afecta esto a la fauna marina (Au & Hastings, 2008). El Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del gobierno español ya ha publicado varios documentos, como los realizados por Payne y Webb en 1983, por Richardson et al. en 1995 o por Aguilar de Soto et al. en 2005, sobre el impacto de la contaminación acústica en las especies marinas que pueden ocasionar daños directos, indirectos, a corto o a largo plazo.

Uno de los mecanismos que mayor capacidad de adaptación al medio marino y a las óptimas condiciones para la propagación de ondas acústicas en este, es la capacidad de ecolocalización que exhiben algunos cetáceos. La producción de clicks de alta frecuencia y el posterior procesado del eco al interceptar obstáculos todavía no se conocen completamente, y la potencialidad de este complejo sistema de localización es todavía un punto de interés para la comunidad científica.

### 1.3. ECOLOCALIZACIÓN

Aunque con el estudio de los cetáceos de forma acústica se hacía evidente el uso de señales para evitar obstáculos o cazar, fue en otra especie de mamífero donde se realizó los grandes descubrimientos sobre el funcionamiento de esta capacidad.

En el año 1790, el científico italiano, Lazzaro Spallanzani, descubrió por primera vez que los murciélagos utilizaban sus oídos, y no su vista, para orientarse y cazar en la oscuridad.

Mediante diferentes experimentos realizados con estos animales, en los cuales se les iba aislando la capacidad de ver, oler o escuchar, Spallanzani demostró que los murciélagos que no tenían uso de la vista o del olfato, conseguían evitar diferentes obstáculos, mientras que aquellos a los que se le tapaban los oídos, no lo conseguían. Sin embargo, este científico no consiguió determinar cuál era el mecanismo empleado por estos animales.

En las décadas posteriores, muy pocos científicos investigaban de forma activa la ecolocalización, y no fue hasta el siglo XX, cuando Donald Griffin, un zoólogo



americano, hizo una de las mayores aportaciones a la acústica animal al descubrir cuál era el mecanismo empleado por los murciélagos en la ecolocalización.

Griffin, junto a Robert Galambos, un experto en fisiología auditiva, se dedicó entre 1938 y 1940, a la realización de numerosos ensayos con murciélagos, en los que medían la capacidad de evitar los obstáculos en diferentes condiciones. Repitiendo los experimentos de Spallanzani, en los que se les cubría las orejas a estos animales provocándoles una desorientación casi total (Griffin, 1980).

*Imagen 3: Galambos en uno de los ensayos con sonidos de alta frecuencia*

Galambos fue el que realizó una de las más importantes contribuciones en los ensayos llevados a cabo, al sugerir que también se deberían de emplear sonidos de alta frecuencia como posibles condicionantes para los murciélagos, a la hora de evitar los obstáculos. Tanto Griffin como Galambos pensaron que las altas frecuencias tendrían casi el mismo efecto de desorientación que el taparle las orejas a los murciélagos.

Sin embargo, gracias a un aparato diseñado por el físico George Washington Pierce, capaz de detectar y analizar sonidos en un amplio rango de frecuencias, se descubrió que estos animales captaban los sonidos de alta frecuencia en condiciones de vuelo. Cuando los ensayos se realizaron con pequeños pulsos, se demostró que estos no interferían en el vuelo de los murciélagos y que su atenuación, es decir, su recepción por parte de los animales, era mayor cuando tenían que afrontar los diferentes obstáculos (Griffin, 1980).

En 1940, Griffin sugirió por primera vez, la ecolocalización como termino general para referirse a la amplia variedad de mecanismos de orientación basados en la emisión de señales de sonido y la ubicación de los objetos a distancia por medio de ecos.

Posteriormente, en 1980, René Guy Busnel y James F. Fish matizaron la definición de ecolocalización como: adaptación acústica que poseen algunos animales (como los murciélagos y cetáceos) la cual les sirve para orientarse y localizar obstáculos y presas. Consiste en la emisión de ultrasonidos y la posterior recepción del eco de estos (funcionamiento parecido a un sonar) (Evans & Awbrey, 1988).

Aunque la ecolocalización en los murciélagos ha sido ampliamente estudiada, el mecanismo de funcionamiento de esta capacidad acústica en los mamíferos marinos aun guarda algunas incógnitas.

### *1.3.1. ECOLOCALIZACIÓN EN CETÁCEOS*

Es alrededor de los años 80, en que los científicos comienzan a sentir un mayor interés por como los cetáceos utilizan la ecolocalización para navegar o para cazar, realizando descubrimientos como la anchura del haz de transmisión, o la capacidad de detectar objetos a distancia, y en diferentes condiciones de ruido, de los Tursiops (delfines de nariz de botella) (Evans & Awbrey, 1988).

El agua es un medio mucho más denso que el aire, por lo que presenta diferencias a la hora de la recepción y transducción de sonidos por parte de los órganos auditivos de los animales acuáticos, en relación con los de los animales terrestres. En la actualidad se está estudiando con gran interés la forma en la que el sonido llega a la cabeza de los

cetáceos para continuar hasta el órgano auditivo, y como este mismo órgano es capaz de enviar impulsos nerviosos al cerebro con la información “procesada”.

También se están desarrollando diferentes estudios en base al rango de frecuencias en las que pueden oír los cetáceos, así como sobre la capacidad de discriminar frecuencias, diferentes intensidades, sonidos complejos o la audición direccional. El conocimiento de estas diferentes propiedades del sistema auditivo de estos animales es importante y esencial para entender como utilizan y procesan las señales acústicas, y que significado atribuyen a cada uno de los sonidos.

La medición de la respuesta de las fibras del nervio auditivo a diferentes estímulos acústicos, mediante técnicas electrofisiológicas, es decir, la medida del potencial evocado, es la manera más práctica de evaluar la sensibilidad auditiva de los animales marinos. Se realiza sobre todo en animales varados o atrapados (Au & Hastings, 2008). Castellote et al., en 2014, consiguieron describir el espectro audible (4 – 150 kHz) y las sensibilidades de siete ejemplares de belugas sanas en libertad, llegando a la conclusión de que el oído de estos animales es bastante sensible.

Todos los odontocetos (cetáceos dentados) presentan en la parte delantera del cráneo, un órgano más o menos globoso, denominado melón, por el que son transmitidos los sonidos o chasquidos (pulsos cortos) que producen en los sacos nasales, y que son los que rebotaran contra los objetos. Cuando estos pulsos cortos regresan y alcanzan de nuevo al animal, son canalizados, a través de senos llenos de aceite en la mandíbula inferior (funcionan como ventanas acústicas), hasta el oído interno. Con estos ecos, el cerebro procesa e interpreta la información para hacer una imagen bastante completa del objeto ecolocalizado (Ketten, 1994). En el caso de las belugas, la generación de sonido se produce por presión de aire modular en el interior de su tracto nasal, provocando la vibración de los conocidos como labios fónicos y generando los pulsos hacia el melón. (Ridgway & Carder, 1980).

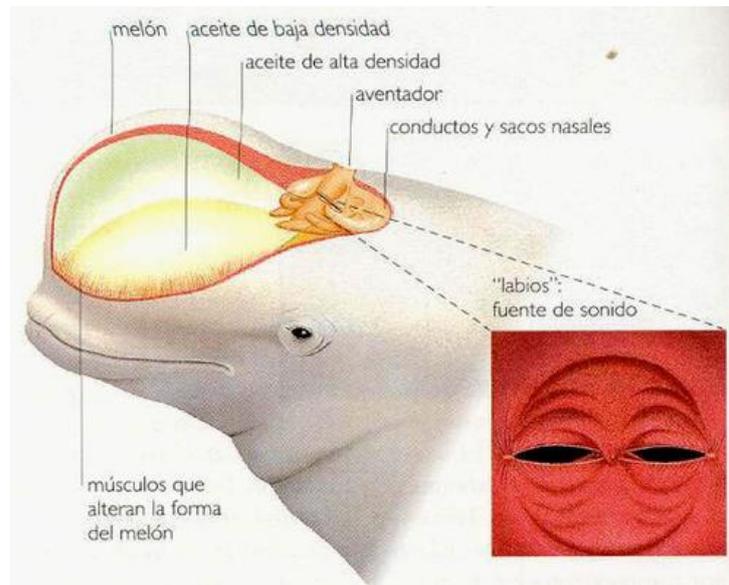


Figura 6: sistema acústico de las ballenas que produce pulsos cortos.

Algunas especies de cetáceos, cuando ecolocalizan, son capaces de emitir una serie de clicks formados por múltiples pulsos, lo que supondría una ventaja ante determinados obstáculos acústicos, como son las burbujas.

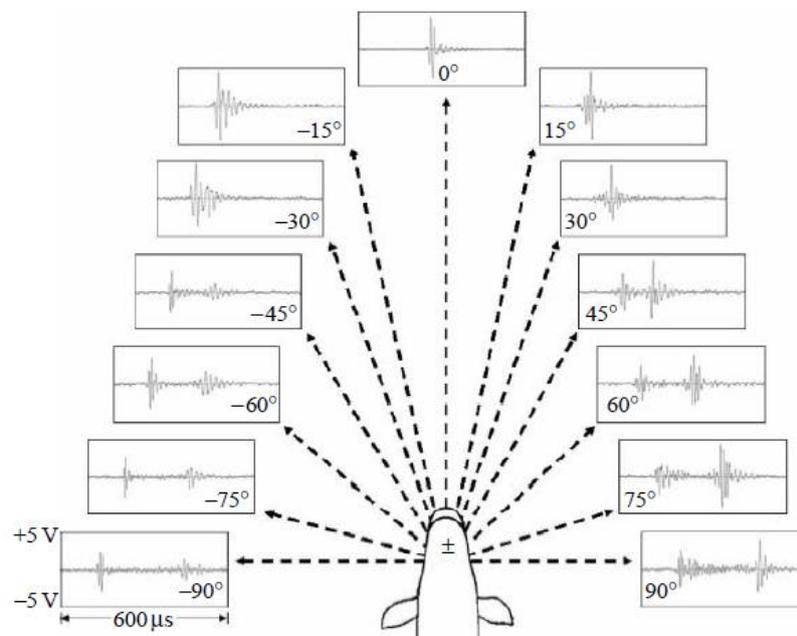
El cachalote (*Physeter macrocephalus*) es el ejemplo de odontoceto más estudiado cuyos clicks tienen una estructura de múltiple pulso, y dicha estructura se toma como reseña para el estudio de especies de cetáceos de tamaño menor debido a que los estudios de estos animales en libertad son escasos, siendo más abundantes los estudios realizados en condiciones de cautividad, en los que hay un mayor nivel de control sobre las variables experimentales. Por lo que, aunque los estudios en tanques sean muy útiles para el estudio del mecanismo de ecolocalización, los estudios de campo son necesarios para conocer el verdadero alcance de esta capacidad.

La estructura multi-pulso de los cachalotes puede ser explicada mediante el modelo conocido como "bent horn", el cual dice que cada click de ecolocalización consiste en una serie de impulsos, resultado de las reflexiones que se dan dentro del melón. Al igual que los pulsos normales, también decaen en el tiempo y se producen a intervalos regulares. Su estructura depende de la orientación de la ballena respecto al observador.

Hay dos estructuras diferentes de multi-pulso. En una de ellas, los pulsos se solapan; en la otra no se produce dicho solapamiento. En la estructura con solapamiento, el pulso principal se superpone en el tiempo con los pulsos posteriores (producidos por la

reflexión). En la estructura sin solapamiento, se diferencian de forma clara los pulsos de forma individual (Finfer et al. 2012).

En el caso concreto de las belugas, se han dado evidencias empíricas de que en la ecolocalización, generan dos pulsos simultáneos al hacer vibrar ambos labios fónicos. Estos pulsos se combinan a medida que el animal los transmite para producir un solo click de alta frecuencia. La generación de estos pulsos hace que la beluga tenga la capacidad de controlar la distribución de energía y la frecuencia del click emitido, permitiendo dirigir el haz de ecolocalización, y proporcionándole determinadas ventajas, ya que una señal de mayor amplitud transmitirá más energía y, por tanto, tendrá un rango mayor de detección de blancos (Lammers & Castellote, 2009).



*Figura 7: pulsos sonar producidos por la beluga en intervalos de 15° y en un ángulo de 180° respecto a la horizontal (Lammers & Castellote, 2009).*

Au et al. (1985) describieron que las frecuencias moderadas utilizadas por las belugas para ecolocalizar están en un rango de 40-60 kHz. Estando las mayores frecuencias registradas en un rango de 100-120 kHz.

Hasta ahora se ha conseguido verificar de forma experimental la ecolocalización para *Pseudorca crassidens* (falsa orca), *Grampus griseus* (calderón gris), *Globicephala melas* (ballena piloto de aleta larga), *Globicephala macrorhynchus* (ballena piloto de aleta corta), *Platanista minor* (delfín del indoor) y *Delphinapterus leuca* (beluga). También se ha demostrado esta capacidad para *Cephalorhynchus commersonii* (delfines de Commerson) y *Phocoenoides dalli* (marsopas de Dall), mediante el registro de señales de banda estrecha producidas por estas especies al cazar o evitar objetos (Evans & Awbrey, 1988).

### ***Cephalorhynchus commersonii* (delfines de Commerson)**

Fue el primer miembro de su género en el que se realizaron observaciones acústicas. A pesar de la existencia de varios individuos de esta especie en cautividad, las publicaciones sobre sus vocalizaciones acústicas son escasas. Sin embargo, según investigaciones recientes los impulsos emitidos por los delfines de Commerson son los que más alcance y mayor energía tienen en comparación con los impulsos de las otras especies estudiadas, por lo que esta especie podría ser considerada más especializada, en cuanto a ecolocalización, que el resto (Evans & Awbrey, 1988).

Watkins et al. en 1966 consiguieron realizar observaciones acústicas de esta especie con un equipo capaz de grabar frecuencias de 60 Hz a 10 kHz. En 1980, Watkins y Schevill, en un estudio de las vocalizaciones de estos delfines, reconocieron sonidos generados por esta especie con energía de hasta, al menos, 100 kHz. En ese mismo año, Kamminga y Wiersma, en un estudio realizado con especies en cautividad, observaron una serie de solapamientos entre pulsos con una energía de 120 kHz. Se descartó la posibilidad de que los pulsos secundarios en esta superposición fueran debidos a la reflexión de la señal contra la interfaz mar-aire o contra las paredes del tanque, debido a que estos eran constantes en el tiempo y no variaban según la geometría del obstáculo, por lo que se concluyó que los impulsos secundarios que se superponían eran resultado de la reverberación dentro de la cabeza del animal. Es decir, se ponía de manifiesto una estructura multipulso en la ecolocalización de los delfines de Commerson (Finfer et al. 2012)

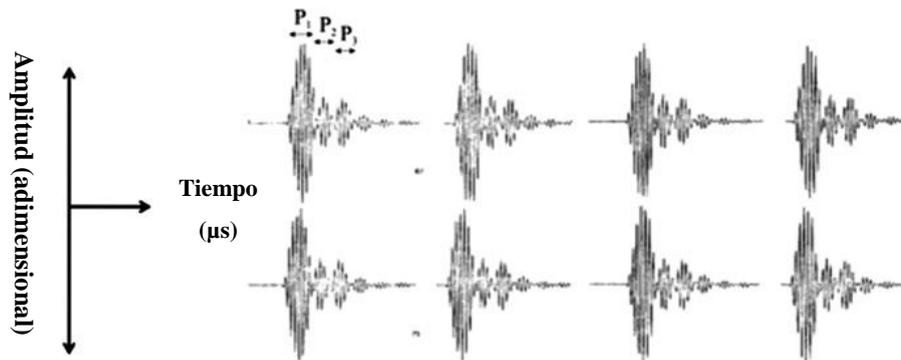


Figura 8: señal de ocho clicks diferentes, registrados por Kamminga y Wiersma, que muestran la estructura multi-pulso como una secuencia de pulsos en descomposición. Se clasificaría, en este caso, dentro de la variedad de estructura solapada (Finfer et al. 2012).

### ***Tursiops truncatus* (delfines de nariz de botella)**

Un estudio realizado en 1974 por Au et al., donde se realizaron mediciones de señales de ecolocalización emitidas por dos ejemplares de esta especie, pusieron de manifiesto varias propiedades hasta entonces desconocidas del sonar animal. Esta especie de delfín posee un sistema sonar muy específico, con el que es capaz de detectar diferentes diámetros de bolas esféricas, diferencias en el material de las placas, diferencias en el espesor de discos metálicos, diferencia de placas en forma de triángulos, círculos y cuadrados.

Las frecuencias máximas a las que Au et al. detectaron que los *Tursiops* podían emitir señales, estaban en un rango entre 120-130 kHz. Estos valores fueron muy superiores a los medidos con anterioridad para esta misma especie, que hasta entonces estaban entorno a los 30-60 kHz. Esta variación es debida a la zona donde realizó el estudio en 1974, la cual tenía como característica principal un elevado ruido ambiente, al que los *Tursiops* se adaptaron usando clicks de alta frecuencia (Au, 1980)

Aun hay muchos mamíferos marinos en los que se ha de demostrar esta capacidad de forma experimental, y queda un largo camino para conseguir resolver todas las incógnitas que aun guarda la ecolocalización en el medio acuático.

### 1.3.2. **ECOLOCALIZACION A TRAVES DE BURBUJAS**

Como hemos visto anteriormente en la *RESPUESTA DE LAS ONDAS ACÚSTICAS ANTE UN OBSTÁCULO FÍSICO. BURBUJAS DE AIRE* de los conceptos básicos de la acústica, las burbujas son conocidas pantallas acústicas que confunden a los sonares hechos por el hombre.

En el mar, las nubes de burbujas son comunes y son generadas fácilmente por barcos, las olas o diferentes actividades geofísicas. Sería de esperar que dichas nubes afectaran de una forma negativa a la ecolocalización de los cetáceos, sin embargo, recientes investigaciones están siendo capaces de demostrar que los múltiples pulsos de los clicks que generan los cetáceos a la hora de cazar o evitar obstáculos, presentan una ventaja competitiva ante este obstáculo acústico (Finfer et al, 2012).

Sin embargo, en investigaciones recientes con delfines se ha observado que cuando estos cazan soplan una “red de burbujas” alrededor de los bancos de peces, para obligar a estos a agruparse, facilitando la pesca para los delfines. Es decir, las burbujas no intervienen en la ecolocalización de los peces por parte de estos odontocetos. Los investigadores creen que estos cambios en los ecos pueden ser lo que ayuden a identificar los peces en la red de burbujas, aunque esto todavía no ha podido ser demostrado (Finfer et al, 2012). La base estaría en que la amplitud variable de los clicks, permitiría a un tipo concreto de pulsos el paso entre los espacios de la burbujas, consiguiendo así, alcanzar las presas. Como las belugas, además, poseen la capacidad de dirigir el haz de ecolocalización, conseguirían de una forma más eficaz direccionar el pulso entre las burbujas.

El estudio de esta ventaja en la capacidad de ecolocalizar, no solo supondría una mejor comprensión sobre varios de los comportamientos de los cetáceos odontocetos, sino que también se pondría al descubierto las claves del mecanismo que estos animales utilizan a la hora de cazar o evitar obstáculos, pudiendo ser utilizadas para mejorar los biosonares artificiales, los cuales son sonares que intentan imitar el mismo método de emisión de pulsos que los delfines en la ecolocalización y que aun poseen muchas carencias.

La dificultad a la hora de obtener un buen rendimiento en el reconocimiento de los objetos por parte de los sonares activos artificiales reside en varios factores, en las que se incluye una fuerte varianza en los datos debida a las diferentes orientaciones del

blanco, es decir, cuando un biosonar detecta un mismo objeto cuya orientación va cambiando, se puede cometer el error de identificarlo como objetos diferentes (Cauwenberghs et al. 2002); la incapacidad de localizar blancos a través de burbujas de aire, como se mencionó con anterioridad, por parte de los barcos, los cuales pueden detectar la barrera de burbujas y sus características, pero no lo que hay detrás de las mismas.

El objetivo de este trabajo es diseñar y construir un dispositivo para estudiar la capacidad de ecolocalización de las belugas a través de este tipo de pantallas de burbujas. Para ello, realizaremos un estudio preliminar con hidrófonos de bajos coste e hidrófonos de alta gama, para poder establecer si los primeros pueden ser utilizados en este tipo de estudios, Así mismo, se estudiará cuál es la respuesta (el eco) registrado por una ecosonda de alta frecuencia trabajando en las mismas condiciones que la beluga

## **2. MATERIAL Y MÉTODOS**

### **2.1. MATERIALES UTILIZADOS**

#### **2.1.1. TRANSDUCTOR**

Muchos son los sistemas de generación de ondas sonoras que utilizamos en nuestro día a día, como por ejemplo un reproductor de música. En la acústica submarina los sistemas generadores de sonido más utilizados actualmente son los transductores piezoeléctricos (los que se utilizan debajo del agua fundamentalmente para la recepción se denominan hidrófonos).

Para generar o captar ondas de sonido utilizaremos estos sistemas que oscilan en el agua, generando o captando una perturbación en el medio.

Los transductores están formados por una o más piezas (comúnmente de cerámica), que vibran, contrayéndose y expandiéndose, al paso de una señal eléctrica sobre ellas, produciendo así un sonido con una determinada frecuencia. Por lo que generan una señal cuando la presión cambia, de tal forma, que cuando la presión aumenta, una membrana o diafragma, dentro del transductor, mueve una pequeña varilla que presiona las piezas de cerámica, haciendo que estas vibren y se carguen. Un amplificador convierte la carga en una señal remota.

El sonido que se producirá dependerá de las dimensiones de las piezas, como pasa con las teclas de un piano, las cuales están ancladas a diferentes cuerdas con una

determinada longitud, emitiendo así sonidos diferentes. Cuando vas tocando las teclas y la longitud de la cuerda se va acortando, el sonido que se produce es más agudo. Por lo que si con el transductor queremos emitir diferentes sonidos, debemos tener varios grupos de piezas con diferentes dimensiones (Mason, 1964).

En la generación de la onda por parte de los transductores es inevitable producir otras frecuencias (denominadas armónicos) además de la que queremos generar, debido a la inercia del agua cuando se está dando la oscilación de la onda. Con esto podemos distinguir entre pulsos de banda estrecha y pulsos de ancha. Los primeros son aquellos en los que la mayor parte de la energía se debe a la frecuencia que queremos generar, y los segundos cuando, además de la frecuencia que queremos generar (con más energía), se dan muchas más frecuencias.

La situación más deseable a la hora de producir una señal, es que esta sea de banda estrecha para que de esta forma sea más pura, y que por tanto la emisión y recepción de la onda se produzcan con la misma frecuencia. Pero también hay que tener en cuenta la longitud de onda, ya que si utilizamos una banda de emisión y recepción demasiado estrecha, será difícil localizar con precisión el origen de los rebotes a la hora de que estos lleguen del nuevo al transductor. Los fabricantes de transductores, por tanto, establecen unos límites de longitud de onda en los que la banda de los procesos acústicos proporciona una buena calidad a la señal emitida y recibida.

A la hora de generar un pulso acústico por parte del transductor, se ha de determinar la potencia del mismo, es decir, la cantidad de energía eléctrica que se ha de emplear para poder generarlo. La potencia ha de ser suficientemente alta para que la señal recibida se distinga del ruido de fondo, pero no para que se lleguen a producir nuevas frecuencias a las que se les transfiera parte de la energía.

Los transductores tienen una determinada sensibilidad a la hora de emisión y/o recepción de un pulso, que relaciona la tensión eléctrica que ha generado el transductor con la frecuencia con la que se ha emitido o recibido la señal. Cuanto más sensible sea un hidrófono podremos conocer mejor a que frecuencia se ha emitido o recibido una señal con saber la tensión eléctrica del pulso.

Este trabajo se basa en el diseño y construcción de un dispositivo que permita estudiar la capacidad de ecolocalización de las belugas tras burbujas de aires. Con el fin de minimizar costes en este tipo de experimentos, se ha calibrado (apartado de MÉTODOS) un transductor de bajo coste (Hidrófono Aquarian H2A) y se ha estudiado su idoneidad para la realización del experimento, así como para la realización de

estudios cuantitativos con las belugas, comparándolo con hidrófonos de alta gama que, dada la sensibilidad requerida en el experimento son los que finalmente se han elegido para la realización del dispositivo

#### **Hidrófono TC4034 – SN 0106012**

Es un hidrófono de banda ancha ideal para realizar mediciones de sonidos bajo el agua que puedan ir desde 1 Hz de frecuencia hasta los 480 kHz (por lo que es perfecto para



finés de calibración). Es omni-direccional, es decir, se puede utilizar en todas las direcciones y sentidos. El hidrófono está encapsulado en NBR, que es un tipo especial de caucho, que proporciona durabilidad y que asegura una impedancia acústica similar a la del agua.

*Imagen 4: hidrófono TC4034.*

Características:

- Directividad vertical: a 250 kHz. 100, 200, 300 kHz.
- Directividad horizontal: a 100, 200, 300 kHz
- Sensibilidad de recepción: de 5 kHz a 500 kHz
- Sensibilidad de emisión: de 5 kHz a 500 kHz
- Impedancia: de 5 kHz a 500 kHz

#### **Hidrófono Aquarian H2A**

Está diseñado para dar un rendimiento de alta calidad en un dispositivo de bajo coste.

Es muy resistente. Permite la conexión directa con los micrófonos preamplificadores tipo ECM. Ofrece muy buena sensibilidad. Está diseñado con una forma aerodinámica, con una gravedad específica que le ayuda a trabajar en una columna de agua en movimiento. Su tamaño es compacto, lo que proporciona un uso fácil y que sea muy fácil de transportar.



*Imagen 5: Hidrófono Aquarian H2A.*

Este hidrófono pretende ser una alternativa de bajo coste y fácil de usar para fines militares e investigaciones científicas. Aunque está formado por componentes de bajo

coste, se dio prioridad al mantenimiento de determinadas características como es la alta sensibilidad. Sin embargo, muchas de las especificaciones van a depender, en parte, del dispositivo de audio al que esté conectado (como la impedancia de salida).

- Directividad: de <10 Hz a >100 kHz
- Sensibilidad: -180dB re: 1V/μPa (20 Hz a 4 kHz)
- Impedancia de salida: 2 kΩ

### 2.1.2. ALTAVOZ SUBMARINO



Prototipo diseñado por la Universitat d'Alacant en colaboración con la empresa Beyma, ideado originalmente para reproducir firmas acústicas de embarcaciones e instalaciones submarinas.

*Imagen 6: Altavoz submarino*

### 2.1.3. DISPOSITIVO DE AIRE COMPRIMIDO PARA FORMAR LA CORTINA DE BURBUJAS DE AIRE

En el fondo del tanque de las belugas del Oceanogràfic se instalará, por medio de una estructura realizada con tubos de PVC, un tubo de poliamida de 10 mm de diámetro con perforaciones. Por él se hará circular aire, a través de un sistema de aire comprimido, formándose así una cortina de burbujas



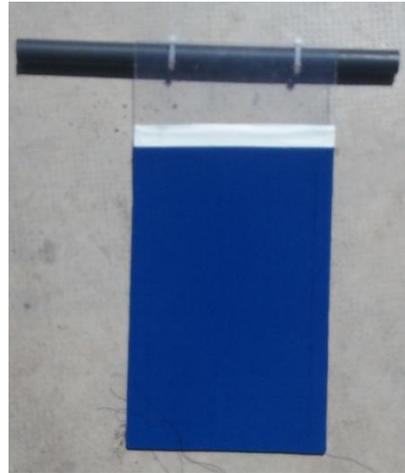
*Imagen 7: Tubo de poliamida perforada sujeto a la estructura de tubos de PVC*

#### 2.1.4. **OBJETO A LOCALIZAR Y BANDEJAS OPACAS**

El objeto que estos odontocetos han de ecolocalizar ha de ser algo que llame su atención y les sirva como premio. Tras hablar con sus cuidadores, se decide que se van a utilizar arenques para la realización del ensayo.

Los arenques se colocaran detrás de unos paneles opacos visualmente pero transparentes acústicamente. Tras realizar varias pruebas acústicas de materiales, mediante una ecosonda Split-beam en las instalaciones universitarias del puerto de Gandía, se determinó que las placas estarán constituidas por tela de lycra cosida a un marco de metacrilato (ecoglass) de 2,5 mm.

El soporte de estas placas se realizó con tubos de PVC, en los cuales también se localizan las sujeciones para los arenques.



*Imagen 8: Placas de tela de lycra sujetas a un marco de metacrilato*

#### 2.1.5. **ECOSONDA EK-60**

Se denomina ecosonda a un sistema sonar que transmite verticalmente. Estos aparatos generan sonidos en pulsos discretos, y tras cada pulso, el sistema espera un determinado período de tiempo para recibir el eco de los obstáculos que se encuentran en el volumen de agua cubierto.

La ecosonda científica EK-60 de Simrad es la más avanzada del mercado según el proveedor, siendo un estándar internacional para el control de las reservas pesqueras. Es capaz de operar de forma simultánea, hasta con siete frecuencias: desde los 18 hasta los 710 kHz.

Con este sistema mediremos el eco de las burbujas, las bandejas y los arenques.

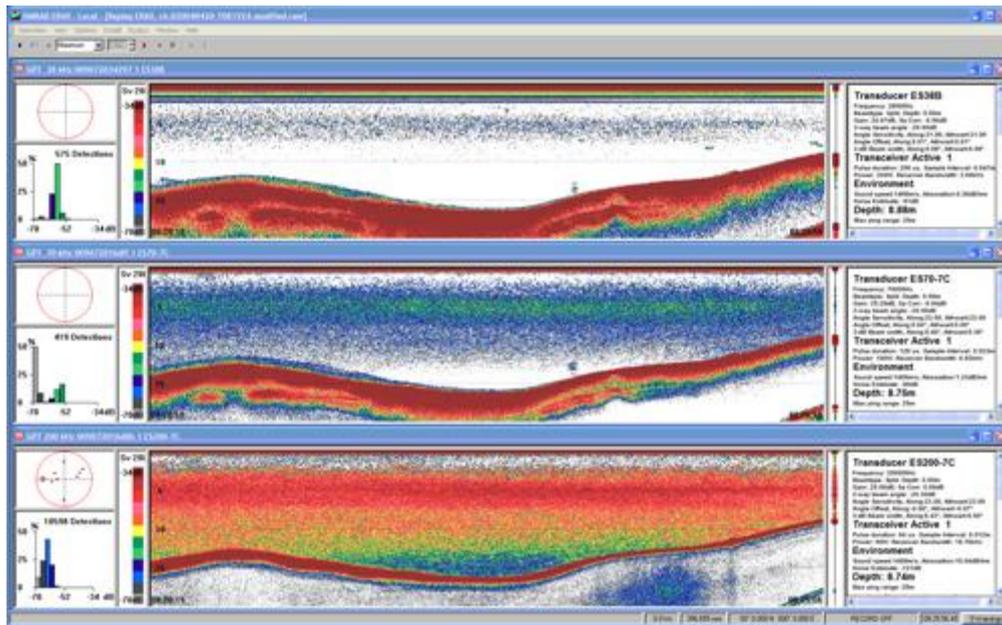


Figura 9: captura de pantalla que muestra una configuración típica de la Simrad EK-60 con tres frecuencias diferentes.

### 2.1.6. Programa MATLAB

Es un software matemático que utiliza un lenguaje de programación propio, utilizado por ingenieros y científicos. Es empleado en proyectos tales como modelización del consumo de energía para redes eléctricas inteligentes, análisis de datos climatológicos para visualizar el recorrido e intensidad de los huracanes, y ejecutar simulaciones en varios campos de la física, como es la acústica.

#### Análisis y visualización de datos

Ofrece herramientas para adquirir, analizar y visualizar datos. Permite reducir de forma considerable el tiempo de trabajo, ya que consigue profundizar en los datos de una forma más rápida.

El MATLAB permite acceder a datos de archivos, otras aplicaciones, bases de datos y dispositivos externos. Es posible, por tanto, leer datos en diferentes formatos de imagen, video y sonido, como archivos tipo WAV. Además incorpora funciones integradas para la creación de gráficos en 2D y 3D, que ayudan a la comprensión de los datos. Estos gráficos también pueden ser personalizados, de forma que podemos destacar lo que más interesa de los mismos.

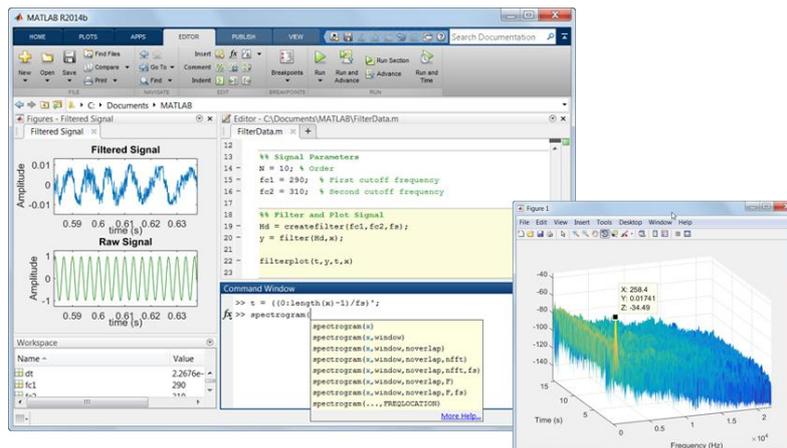


Figura 10: Análisis y visualización de datos en MATLAB

## Programación y desarrollo de algoritmos

Proporciona un lenguaje de alto nivel y herramientas para desarrollar y analizar algoritmos y aplicaciones con rapidez.

## Desarrollo y distribución de aplicaciones

A través de herramientas y productos complementarios de este software es posible el desarrollo y distribución de aplicaciones.

### 2.1.7. ADOBE AUDITION

Es un software en forma de estudio de sonido de Adobe Systems Incorporated que permite la grabación, mezcla (multipista), edición y masterización de audio digital. Posee potentes herramientas para la producción profesional de sonido aunque es sencillo de utilizar.

Las principales funciones son: editar audio, aplicar efectos de sonido, mezclar audio, agregar filtros de audio, utilizar multipista, crear música, compilar y editar una banda sonora, limpiar el audio de una película y grabar y mezclar proyectos.

Con este programa se visualizan los sonidos de las belugas, que fueron grabados con los hidrófonos en el ensayo con el altavoz submarino.



Figura 11: Visualización de las grabaciones en Adobe Audition

## 2.2. MÉTODOS

### 2.2.1. ENSAYO CON ALTAVOZ SUBMARINO

En el año 2006, Yulka, el ejemplar de hembra de *Delphinapterus leucas* de l'Oceanogràfic, se quedó preñada tras una inseminación artificial, pero poco después del nacimiento de la cría se confirmó su fallecimiento.

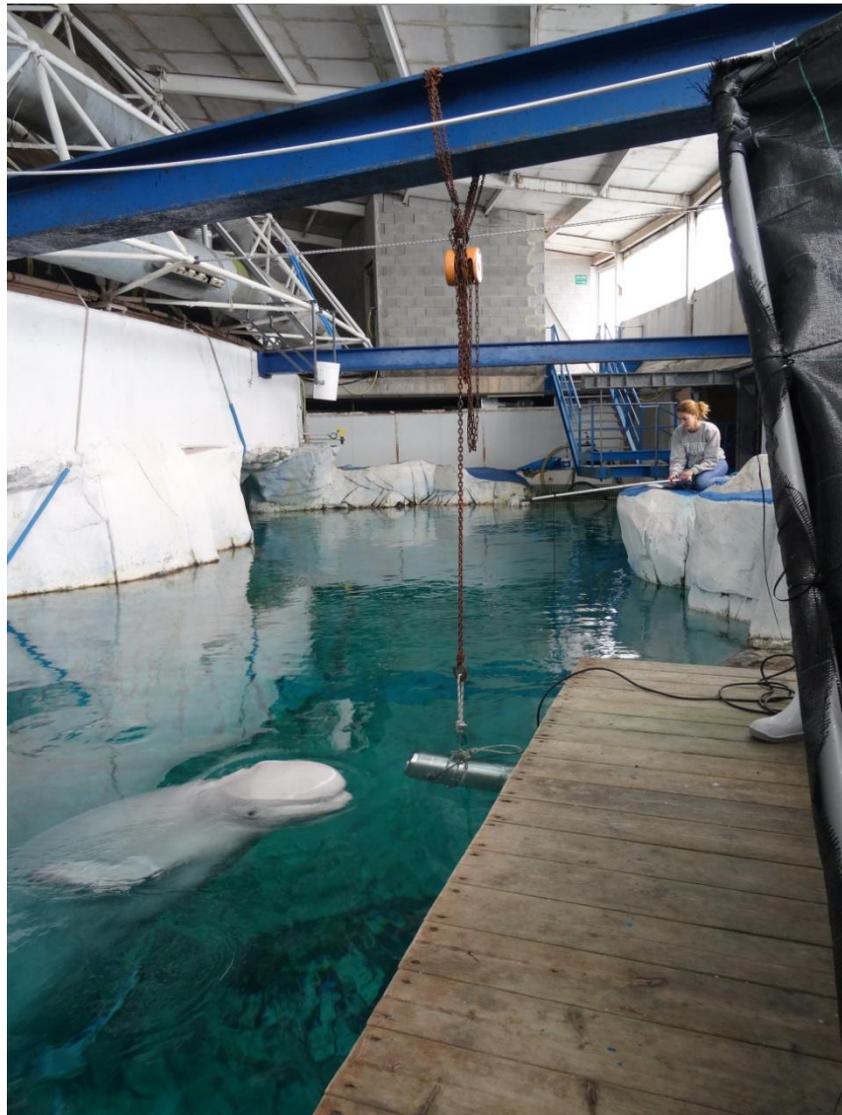
Sabiendo las complicaciones de la reproducción de esta especie en cautividad, no se volvió a intentar la inseminación artificial para no poner en peligro a la hembra.

Nueve años después, en abril del 2015, la organización de este acuario decide volver a intentar que Yulka se quede preñada pero de una forma diferente.

Con ayuda de un altavoz submarino, propiedad de la Universitat de València, se emitieron sonidos de ejemplares de belugas macho grabados en libertad con la intención de despertar en Kairo, el macho en cautividad, el instinto sexual al ver amenazado su puesto ante la hembra.

La emisión duró aproximadamente media hora, y mientras se realizaba, se grabó con un hidrófono Aquarian en tres puntos diferentes del tanque, tanto los sonidos reproducidos por el altavoz, como los producidos por las belugas durante este proceso. La finalidad de este ensayo era establecer si los hidrófonos Aquarian utilizados (de bajo coste) tenían una sensibilidad suficiente para registrar y tratar adecuadamente con los niveles emitidos.

Una vez obtenidas las grabaciones, se visualizaron con el programa Adobe Audition. Aunque los sonidos de las belugas se registraron en el hidrófono, la baja sensibilidad del altavoz, que había sido originalmente diseñado para reproducir sonidos de baja frecuencia y simular fuentes de ruido submarino, no permitía que la reproducción de las altas frecuencias fuese la adecuada, aunque permitió comprobar que los hidrófonos, aunque con baja sensibilidad como era esperable, registrasen los sonidos en el tanque.



*Imagen 9: Ejemplar de beluga ante el altavoz submarino emitiendo*

### **2.2.2. CALIBRACIÓN DE LOS HIDRÓFONOS**

Aprovechando el estudio principal de este proyecto, se llevo a cabo un pequeño estudio sobre el Aquarian H2A.

El departamento de acústica submarina de la UPV adquirió en el año pasado cuatro hidrófonos Aquarian H2A. Estos aparatos están diseñados para dar un rendimiento de alta calidad en un dispositivo de bajo coste. El principal problema, según el proveedor,

es que no son calibrables, por lo que no se podrían utilizar en investigaciones científicas.

Con esta premisa inicial se quiso saber hasta qué punto esto es cierto o no, ya que el hecho de poder utilizar equipos de bajo costes en diferentes estudios e investigaciones, abaratarían las mismas de forma considerable y lógicamente el hecho de que un hidrófono no esté calibrado no quiere decir que no sea calibrable.

Se emplea el método de calibración directa, el cual consiste en someter al hidrófono que se pretende calibrar y a un hidrófono calibrado, a la misma presión producida por un tercer transductor y comparar los voltajes de salida eléctrica de los dos hidrófonos en cuestión. De esta forma a través de la sensibilidad conocida del hidrófono calibrado y las medidas de los voltajes, podremos conocer la sensibilidad del hidrófono a calibrar.

En el ANEXO I, viene explicado y desarrollado de forma completa el proceso que se realizó en el laboratorio de acústica de la Escuela Politécnica Superior de Gandía para llevar a cabo este método de calibración del Aquarian H2A.

### ***2.2.3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL***

El ensayo se realizará en el tanque de l'Oceanogràfic, donde se mantienen a dos ejemplares de beluga.

Se construirá una estructura cerrada, en la que se generaran burbujas de aire, con las que aislar el objeto a ecolocalizar por el animal

Mediante un tubo de poliamida de 10 mm de diámetro con perforaciones y un sistema de aire comprimido, se formará la cortina de aire que funcionará como obstáculo para los cetáceos. Este dispositivo se colocará en el fondo del tanque, a 5,5m, mediante una estructura realizada con tubos de PVC. La distancia de esta cortina de aire respecto a la pared, será de alrededor de los 35-40 cm, dado que es el espacio justo para colocar las bandejas opacas con los arenques sin que la beluga consiga atravesar con la cabeza la cortina de burbujas.

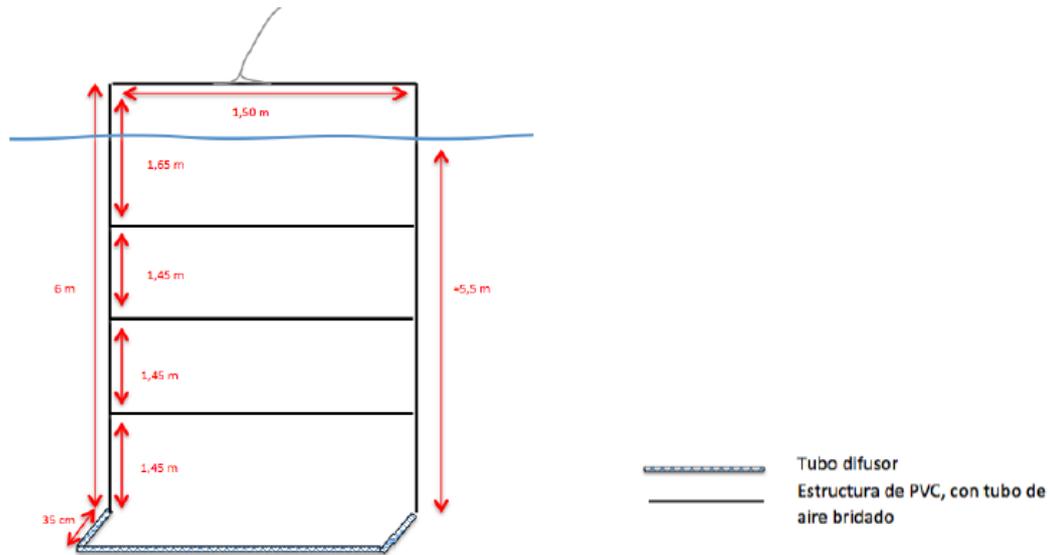


Figura 12: Diseño de las bandejas opacas con los sistemas de sujeción de los arenques.

Aproximadamente a 15 cm de la pared y a 20 cm de la cortina de burbujas se situarán cuatro bandejas de lycra y metacrilato mediante un soporte de PVC. Estas bandejas son opacas visualmente pero transparentes acústicamente. El arenque, es decir, el objeto a ecolocalizar, se situará en uno de los cuatro lugares cada vez. No se seguirá un orden en la posición, para evitar que las belugas localicen el pescado de forma metódica y no por ecolocalización.

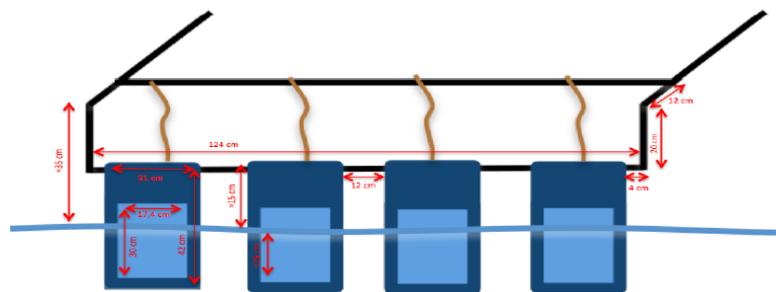


Figura 13: Diseño de las bandejas opacas con los sistemas de sujeción de los arenques.

Como las belugas no podrán sobrepasar la cortina de burbujas, para indicar dónde está el arenque, se añadirán unos dispositivos target al montaje. De esta forma, estos cetáceos podrán indicar donde se encuentra el pescado sin necesidad de atravesar las burbujas, demostrando así si son capaces de “ver” o no a través de este obstáculo acústico. Para llevar a cabo esta parte, será necesario el entrenamiento de las belugas.

Delante de la cortina de burbujas y detrás de las bandejas opacas se situarán dos hidrófonos (es decir, cuatro en total), para poder grabar las señales generadas por los odontocetos.

El dispositivo completo se situará en una zona del tanque que cuenta con una plataforma de madera donde trabajan los entrenadores. La cortina de burbujas aislará esa pequeña zona del resto, por lo que las belugas solo podrán detectar los arenques por ecolocalización.

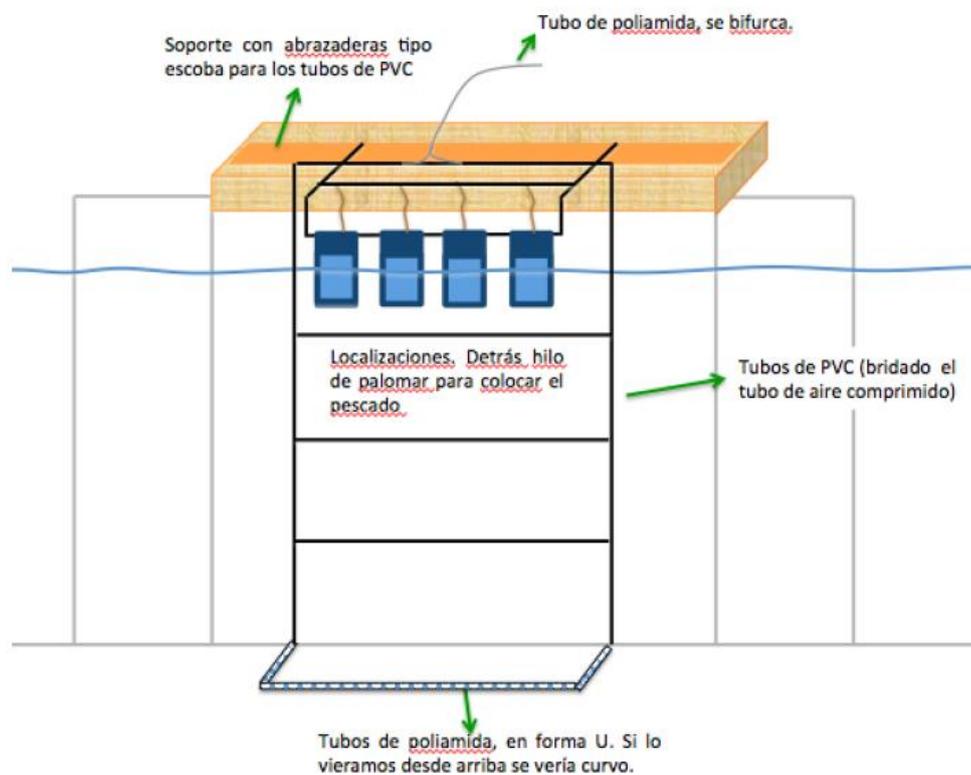


Figura 14: Diseño experimental completo

El mismo montaje será medido acústicamente con una ecosonda emitiendo a 200 kHz, para registrar el eco producido por las burbujas, las bandejas y el arenque. El fin de emitir con este aparato, es conseguir “ver” de una forma acústica lo mismo que la beluga.

### **Recogida de datos**

Se realizarán cinco sesiones de diez ejercicios cada una, teniendo finalmente un total de cincuenta ejercicios realizados con los que se puede realizar un análisis estadístico con resultado significativo.

Si la beluga no logra ecolocalizar los objetos a través de las burbujas, se considera que es porque ha fallado en un 75% de las veces y que, por lo tanto, ha acertado en un 25%. Si el número de aciertos supera el 25% de forma significativa, entonces si se considera que las belugas consiguen ecolocalizar a través de las burbujas. En este caso, las señales emitidas por estos animales serán registradas por los hidrófonos, tanto antes como después de la cortina de burbujas, para posteriormente ser analizadas y determinar cómo consiguen “ver” tras un obstáculo acústico tan fuerte como es el aire.

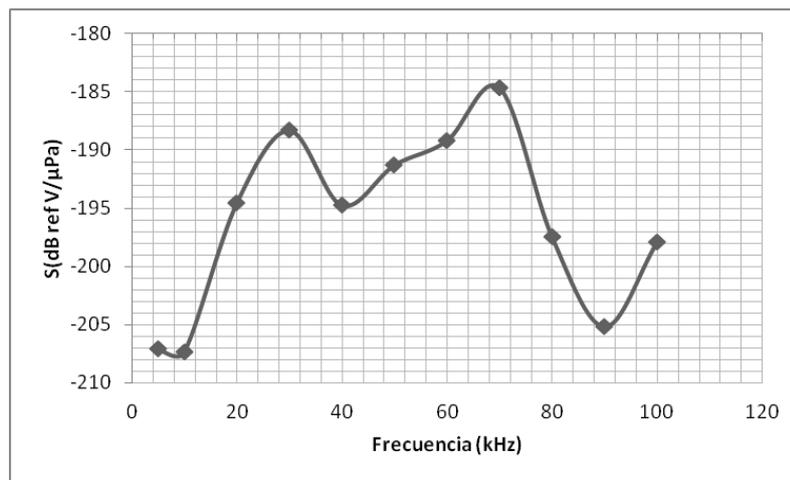
Las fichas para la recogida de datos se encuentran en el ANEXO II.

## **3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

### **3.1. CALIBRACIÓN DE LOS HIDRÓFONOS**

En la calibración directa, tras tratar los datos obtenidos con el programa Matlab, se obtuvo una gráfica sensibilidad/frecuencia necesaria para la calibración el Aquarian H2A antes de cada uso en una investigación científica.

Tras analizar el resultado de esta curva obtenida, con unos resultados aproximados a las indicaciones promedios del fabricante (máxima sensibilidad -180 dB ref 1V/ $\mu$ Pa) se llegó a la conclusión de que el hidrófono Aquarian no tiene la sensibilidad suficiente para frecuencias muy bajas, y una sensibilidad baja para frecuencias altas, aunque podría llegar a utilizarse para estudios cuantitativos con cetáceos. Sin embargo, y dado que lo que se pretende en el experimento es registrar el pulso emitido y recibido por la beluga con el mayor detalle posible, se optó por utilizar los hidrófonos de alta gama de mayor sensibilidad.



*Grafica 1: resultado de la calibración directa del Aquarian H2A*

### 3.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

La construcción de las estructuras necesarias para desarrollar el estudio se realizó en el campus de Gandia y posteriormente fueron transportadas a l'Oceanografic donde se montaron.



*Imagen 10: Estructura para la generación de burbujas.*

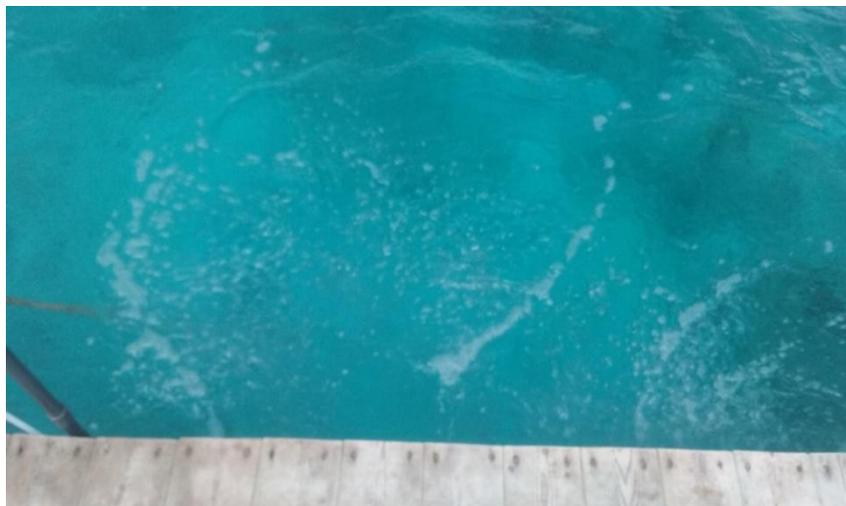


*Imagen 11: Las 4 placas de metacrilato y lycra*

Se realizaron pruebas del circuito de aire, metiéndolo en el tanque y conectándolo al sistema de aire comprimido que posee el acuario.



*Imagen 12: Estructura dentro del agua.*



*Imagen 13: Burbujas generadas por la estructura.*

Debido a que Yulka se encuentra preñada, el estudio sobre la capacidad de ecolocalización a través de las burbujas se encuentra actualmente parado, ya que no es conveniente someter a estrés a la hembra en esta etapa de la gestación. Se retomará el estudio una vez pasados los meses de riesgo y antes del nacimiento de la cría.

## 4. DISCUSIÓN

El mecanismo de la ecolocalización aún guarda bastantes incógnitas para el mundo de la ciencia. Poco a poco se van realizando nuevos avances que nos ayudan a comprender más acerca de como los cetáceos odontocetos utilizan esta capacidad en su día a día y frente a diferentes obstáculos y situaciones.

El ensayo que se pretende realizar en este trabajo, y que por motivos ajenos va a tener que ser pospuesto hasta que Yulka y la cría no corran ningún tipo de riesgo, quiere poner al descubierto el comportamiento y la respuesta ante una pantalla acústica, como es el aire, por parte de *Delphinapterus leuca*, lo que supondría un gran avance en el estudio del mecanismo de la ecolocalización.

También supondría un avance para los sonares humanos, ya que podrían ser mejorados, utilizando frecuencias diferentes a las empleadas por los cetáceos, con el fin de evitar la contaminación acústica que hay en nuestros mares. Además supondría una mejora de las utilidades habituales de los sonares, por ejemplo, se podrían localizar barcos en zonas turbulentas donde se generan muchas burbujas de aire.

Con el presente trabajo también se deja demostrado que los dispositivos de bajo coste no tienen suficiente sensibilidad para el experimento propuesto, aunque sí podrían ser utilizados en otros estudios.

En el futuro se propone trabajar con incluyendo un amplificador en el método de calibración directa y realizar así mismo una calibración por reciprocidad. El estudio para poder utilizar aparatos de un coste reducido, en investigaciones científicas o militares, supondría un abaratamiento de las mismas de una forma considerable, pudiendo aumentar su número de una forma notable.

Aunque las belugas de l'Oceanografic lleven en cautividad más de una década, reaccionan de una forma normal ante estímulos externos, como son los sonidos emitidos por ejemplares en libertad. Con esto podremos conocer más acerca de los comportamientos de estos animales y caracterizar sus sonidos para conocer que significan cada uno de ellos.

Una El dispositivo experimental está preparado para estudiar la ecolocalización detrás de cortinas de burbujas por parte de las belugas, y se espera poder realizar las medidas una vez la hembra haya parido y aceptado a la cría, para lo cual puede ser necesario un período total de más de dos años.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

Au, W. W. L. (1980) Echolocation Signals of the Atlantic Bottlenose Dolphin (*Tursiops truncatus*) in Open Waters. *Animal Sonar Systems* (Busnel, R. & Fish, J. F.), pp. 251-282. Naval Ocean Systems Center, Hawaii.

Au, W. W. L. & Hastings, M. C. (2008) *Principles of Marine Bioacoustics*. Spring Street, New York.

Castellote, M. Mooney, T. A., Quakenbush, L., Hobbs, R., Goertz, C. & Gaglione, E. (2014). Baseline hearing abilities and variability in wild beluga whales (*Delphinapterus leucas*). *The company of Biologist: The Journal of Experimental Biology*. **217**, 1682 - 1691

Cauwenberghs, G., Edwards, R., Deng, Y., Genov, R. & Lemonds, D. (2002). Neuromorphic processor for real-time biosonar object detection. *IEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 864 – 867. Johns Hopkins University, Baltimore.

Childers, K. H., Flagg, C. N. & Rossby, T. (2014) Direct velocity observations of volume flux between Iceland and the Shetland Islands. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **119**, 5934–5944.

Evans, W. E. & Awbrey, F. T. (1988) Natural History Aspects of Marine Mammal Echolocation: Feeding Strategies and Habitat. *Animal Sonar* (Nachtigall P.E. & Moore, P. W. B), pp. 521-534. Plenum Press, New York.

Finfer, D. C., White, P. R., Chua, G. H. & Leighton, T. G. (2012). Review of the occurrence of multiple pulse echolocation clicks in recordings from small odontocetes. *IET Radar, Sonar and Navigation*, **6**, 545 – 555

Griffin, D. R. (1980) The early history of research on echolocation. *Animal Sonar Systems*. (Busnel, R. & Fish, J. F), pp.1-8. The Rockefeller University, New York.

Ketten, D. R. (1994) Functional Analyses of Whale Ears: Adaptations for Underwater Hearing. *OCEANS '94: Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation/IEEE*, PP. 264-270, Harvard Medical School, Boston.

Lammers, M.O. & Castellote, M. (2009) The beluga whale produces two pulses to form its sonar signal. *Biology letters*, **5**, 297 – 301

Lurton, X. (2002) *An introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*. Springer-Praxis books in geophysical sciences, Chichester.

Mason, W. P. (1964) *Physical Acoustics: Principles and Methods*. Volume I. Academic press, New York.

Ridgway, S. H. & Carder, D. A. (1980) Nasal Pressure and Sound Production in an Echolocating White Whale, *Delphinapterus leucas*. *Animal Sonar* (Nachtigall P.E. & Moore, P. W. B), pp. 53 – 60, Naval Ocean Systems Center, San Diego.

Rossby, T., & Flagg, C. N. (2012) Direct measurement of volume flux in the Faroe-Shetland Channel and over the IcelandFaroe Ridge. *Geophysical Research Letters*, **39**.

Rus Hoelzel, A. (2002) *Marine Mammal Biology*. Blackwell Science Ltd, Oxford.



Sánchez, N. (2012) *Técnicas acústicas y software libre: Aplicaciones en la gestión costera*. Tesis doctoral, Universidade da Coruña, España.

Simrad. Technology for sustainable fisheries. <<http://www.simrad.com/ek60>> [Consultada: 29-09-2015]

The MathWorks, Inc. 1994-2015 <<http://es.mathworks.com/products/matlab/features.html>> [Consultada: 28-09-2015]

Zimmer, W. M. X. (2011) *Passive Acoustic Monitoring of Cetaceans*. Cambridge University Press, Cambridge.