

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# “Estimación indirecta del target strength (TS) con ecosondas científicas de haz simple”

**TESIS DE MASTER**

Autor:  
**Alejandro Cebrecos Ruiz**

Director/es:  
**D. Víctor Espinosa Roselló**

**GANDIA, 2010**

# Estimación indirecta del target strength (TS) con ecosondas científicas de haz simple

*Autor:* Alejandro Cebrecos Ruiz

*Director:* Víctor Espinosa Roselló

*Resumen* — El objetivo de este trabajo es desarrollar y comprobar la fiabilidad de una aplicación de procesado pensada para la medida indirecta de la potencia de blanco (TS) de peces, con vistas a la integración de ésta en una ecosonda científica de haz simple. Se emplean mediciones dorsales y ventrales de 5 clases de doradas (*Sparus Aurata*) clasificadas según su tamaño, realizadas con la ecosonda de haz dividido EK60. Se analizan los datos con y sin información de fase. Los datos registrados por ecosondas de haz simple carecen de información sobre la posición relativa del blanco respecto del haz emitido, por lo que es necesario el empleo de técnicas inversas para eliminar la dependencia del TS con la directividad del transductor. Entre los diversos métodos existentes, el método adaptativo de inferencia, maximización y suavizado (AEMS) logra unos resultados similares a los obtenidos por métodos directos. Se realizan varias comparaciones para comprobar el correcto funcionamiento de la aplicación. En primer lugar, entre las distribuciones de TS sin compensar, eliminando la información angular, con las obtenidas empleando un software fiable, Sonar Pro 5. En segundo lugar, se comparan las distribuciones de TS obtenidas mediante análisis de haz simple con las que se obtienen mediante análisis de haz dividido, con información de fase.

*Abstract*—The aim of this work is to develop and verify the reliability of a processing application thought for the indirect measurement of target strength (TS), with a view to the integration into a single-beam system. Dorsal and ventral measurements are carried out for Gilt-head sea-bream (*Sparus Aurata*) for 5 size classes using a split-beam EK60 echosounder and single-beam data obtained from one of the channels from the echosounder. Data measured using single-beam system lacks information about the relative position of the target on the transducer's beam, making it necessary to use inverse techniques to eliminate the dependence of TS with the beam pattern of the transducer. Among the various existing techniques, the adaptive maximization, expectation and smoothing method (AEMS) achieves results similar to those obtained using direct methods. In order to confirm the proper functioning of the application, several comparisons are made. Firstly, between uncompensated target strength (TSu) distributions from EK60 echosounder, regardless of the phase information with those obtained using reliable software, Sonar Pro.5. Secondly, comparing TS distributions from the analysis made with the single-beam data with that obtained using the split-beam echosounder EK60.

Autor: Alejandro Cebrecos Ruiz, email: [alcebrui@epsg.upv.es](mailto:alcebrui@epsg.upv.es)

Fecha de entrega: 6-9-2010

**INDICE**

<b>I.</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>II.</b>	<b>Estimación de la potencia de blanco o target strength (TS) de peces .....</b>	<b>6</b>
II.1.	Target Strength.....	7
II.2.	Ecuación del sonar.....	10
II.3.	Métodos de estimación del TS .....	12
II.3.1.	Estimación de la potencia de blanco “Ex situ” e “In situ” .....	12
II.3.2.	Estimación directa de la potencia de blanco.....	13
II.3.3.	Estimación indirecta de la potencia de blanco. Ecuación integral de haz simple.....	14
II.4.	Detección de ecos individuales .....	15
<b>III.</b>	<b>Método adaptativo de inferencia, maximización y suavizado(AEMS) .....</b>	<b>18</b>
III.1.	Fundamentos del método.....	18
III.2.	Determinación de la función distribución de probabilidad del patrón de radiación del transductor .....	20
III.3.	Influencia del umbral en la ecuación integral de haz simple.....	21
<b>IV.</b>	<b>Evaluación del algoritmo .....</b>	<b>24</b>
IV.1.	Mediciones empleadas para los análisis .....	25
IV.2.	Análisis single-beam .....	27
IV.2.1.	Distribuciones de TS sin compensar .....	27
IV.2.2.	Relación entre el TS sin compensar y la longitud del pez.....	30
IV.3.	Comparación de resultados. Split beam VS Single beam .....	32
IV.3.1.	Distribuciones de TS .....	32
IV.3.2.	Relación entre el TS y la longitud del pez.....	34
<b>V.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>35</b>
V.1.	Conclusiones .....	35
V.2.	Líneas futuras .....	36
	<b>Agradecimientos .....</b>	<b>37</b>
	<b>Referencias .....</b>	<b>38</b>
	<b>Anexos .....</b>	<b>40</b>
	<b>Anexo 1. Código Matlab de todas las funciones que forman la aplicación de procesado.....</b>	<b>40</b>
	<b>Anexo 2. Comparison of target strength (TS) distributions by means of the use of direct and indirect techniques in sea cages.....</b>	<b>55</b>
	<b>Anexo 3. Medida del target strength dorsal y ventral de la dorada (Sparus Aurata) en jaulas marinas, empleando métodos directos e indirectos .....</b>	<b>60</b>

## I. INTRODUCCIÓN

La acuicultura marina ha experimentado un aumento considerable en los últimos años debido a la escasez de recursos pesqueros, constituyendo no sólo una industria creciente sino una auténtica realidad en el Mar Mediterráneo. En el año 2008 se alcanzó una producción de 57,893 toneladas de Lubina (*Dicentrarchus Labrax*) y 84,593 toneladas de Dorada (*Sparus Aurata*), producidas principalmente en Grecia, Turquía, Italia y España. [1]. En el caso de la Dorada procedente de pesca extractiva, su volumen ha fluctuado entre las 5000 y 8000 toneladas anuales en los últimos años, lo que se traduce en que prácticamente la totalidad de la Dorada que se consume hoy en día proviene de la acuicultura marina (90-95%).

La estimación del crecimiento de los peces y la biomasa son esenciales en acuicultura marina con el fin de preparar el plan de producción de las granjas de peces y de organizar y llevar a cabo diversas operaciones de gestión, tales como la distribución de los peces, la descarga de nuevos lotes, la programación de la extracción de los ejemplares o el cálculo de las tasas de alimentación diarias, entre otros. A pesar de que la tecnología existente tiene suficiente capacidad como para cubrir las necesidades de producción, resulta necesario optimizar varios factores de producción no sólo para mejorar su rentabilidad económica sino también para minimizar los posibles impactos ecológicos. Entre estos factores, cabe destacar la estrategia de alimentación y el seguimiento del crecimiento de los peces en el interior de las jaulas. La alimentación diaria se calcula en función de la biomasa presente y es función de diferentes factores como son el tamaño medio de los peces, la estación, la temperatura del agua, etc. Por lo tanto, la estimación del tamaño (masa) y el número de ejemplares son consideradas cruciales para una gestión adecuada de la producción.

Entre las distintas técnicas empleadas para alcanzar tales propósitos en el control de granjas marinas, las técnicas acústicas [2], [3], proporcionan la capacidad necesaria para hacerlo. No obstante, el alto precio de las ecosondas científicas comerciales existentes hace que la instalación permanente de estos equipos en jaulas marinas sea complicada. Si se tiene en cuenta que las ecosondas de tipo single-beam constituyen el sistema más asequible entre las ecosondas científicas existentes, el uso de este tipo de sistema puede ser una elección adecuada para su instalación en granjas marinas. Para confirmar esta afirmación, resulta necesario verificar la viabilidad de monitorizar el crecimiento, abundancia y alimentación de peces en jaulas marinas usando este tipo de sistemas.

El parámetro empleado en acústica submarina que describe las propiedades acústicas de un objeto sumergido es la potencia de blanco o target strength (TS). Este parámetro indica la capacidad que tiene el objeto de reflejar la onda acústica incidente de vuelta a la ecosonda. Como se verá posteriormente con mayor profundidad, es una medida en escala logarítmica de la proporción de energía incidente que se dispersa en la dirección de vuelta. Cuando se trata de peces,

la potencia de blanco depende de la orientación del pez relativa al haz emitido, y en el caso de peces con vejiga natatoria, como la dorada, depende fuertemente de la forma y tamaño de esta, al ser este órgano el responsable de la mayor parte de la energía reflejada.

La potencia de blanco tiene una relación lineal con la longitud de los peces, por lo que puede llegar a dar una estimación del tamaño, peso y crecimiento de los peces. Se han realizado y se están realizando diversos estudios tratando de establecer una relación entre la potencia de blanco y la longitud de diferentes especies pelágicas, principalmente en el caso de medidas dorsales “in situ” realizadas en alta mar [4]. En [5] se presenta un resumen de resultados obtenidos en la relación entre la potencia de blanco y la longitud de los peces para varias especies, principalmente peces con vejiga natatoria, donde se observa una relación lineal que varía en función de la especie analizada. Si las mediciones dorsales se realizan en jaula marina, donde la distancia que separa el transductor y el pez puede ser similar, o incluso inferior a la zona de campo cercano del pez (aproximadamente 6 m para los ejemplares de dorada empleados durante este estudio) puede encontrarse cierta dependencia de la potencia de blanco con la profundidad, complicando la obtención de una buena correlación entre potencia de blanco y longitud del pez.

Muchas especies de peces, incluidos el Besugo, Dorada, Lubina, Atún, Salmón y Arenque, entre otros, cuentan con vejiga natatoria. Se trata de un órgano de flotación lleno de gas, situado por debajo de la espina dorsal y por encima del tubo digestivo. Numerosos estudios demuestran que este órgano es el responsable de la mayor parte de la energía reflejada por el pez [6], [7]. Por lo tanto, la realización de mediciones ventrales en jaulas marinas resulta muy recomendable ya que es probable la obtención de una mejor correlación entre potencia de blanco y longitud del pez que en caso dorsal. Además de la presencia de vejiga natatoria, otros factores tales como el volumen de la misma, la orientación del pez y su comportamiento, provocan distribuciones de potencia de blanco con variaciones que pueden llegar a superar los 10 dB. Sin embargo, a pesar de estar variaciones es posible distinguir acústicamente varias clases de peces de diferente tamaño siempre que durante las mediciones se registren un elevado número de detecciones individuales [8].

En resumen, el objetivo de este trabajo es desarrollar y verificar el correcto funcionamiento de una aplicación de procesado creada en el entorno Matlab para la conversión y análisis de datos procedentes de una ecosonda single-beam, continuando el trabajo iniciado dentro del Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC). [9], [10], con el objetivo conseguir un sistema single beam permanente y asequible, capaz de mantenerse durante largos periodos funcionando ininterrumpidamente en una jaula marina. Para ello, en este trabajo se explica el funcionamiento del programa y se muestran las comparaciones entre los resultados obtenidos a la hora de estimar la potencia de blanco (sin compensar y compensada) en mediciones dorsales y ventrales de doradas realizadas en jaula marina. Estas comparaciones se realizan empleando como elemento de comparación un software de procesado fiable como es el Sonar Pro

5, desarrollado por Helge Balk y Torfinn Lindem [11]. Además se incluyen los resultados obtenidos tratando de establecer una relación entre la potencia de blanco y la longitud del pez.

## II. ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA DE BLANCO O TARGET STRENGTH (TS) DE PECES

Las técnicas acústicas aplicadas a la estimación de la biomasa de peces han ido cobrando mayor importancia con el paso del tiempo, hasta convertirse en la técnica más empleada en investigación en pesquería. Esto se debe, entre otros motivos, a la mejora sustancial que han experimentado en las últimas décadas los sistemas sonar, en concreto, un tipo particular de sonar, como es la ecosonda científica. Véase que el término científica se refiere en este caso a la capacidad de obtener y registrar valores de ecos con un sistema susceptible de ser calibrado. Este tipo de sistema emite un haz acústico por medio de un transductor, que va dirigido verticalmente hacia arriba o abajo, aunque dependiendo del sistema puede orientarse también lateralmente. De manera general, una ecosonda está formada por un transmisor, un transductor, un receptor y un bloque de procesado y representación de los ecos detectados, que puede encontrarse implementado en la propia ecosonda o bien a través de software en un ordenador conectado a ésta.

El ciclo de funcionamiento de la ecosonda comienza en el transmisor, donde se genera un pulso corto, con una duración dependiente del tamaño de los objetos que se deseen detectar. Este pulso de energía eléctrica generado se envía al transductor, que lo transforma en un pulso acústico, y lo radia en un haz direccional que se propaga a través del agua. Cuando se encuentra un obstáculo o blanco el pulso se refleja y dispersa en varias direcciones, y parte de la energía incidente sobre el blanco retorna de vuelta en dirección al transductor, formando lo que se denomina eco. El eco se recibe en el transductor, que lo convierte en una señal eléctrica. La señal se registra en el receptor, donde se incluye el integrador de ecos, que permite la obtención de una señal proporcional a la densidad de peces. Una vez registrada ésta, se procesa hasta convertirla en una medida de la potencia de blanco. Para ello, han de convertirse las magnitudes de tensión registradas en valores de la potencia de blanco, lo que conlleva varias tareas. Por un lado, se necesita un filtrado para mejorar la relación señal a ruido, la aplicación de un amplificador de tensión variable (TVG) que compense la señal por las pérdidas producidas por la divergencia geométrica del haz y la absorción del medio de propagación, la compensación del nivel emitido por el transductor y la compensación de la posición del blanco respecto del haz de emisión. Por otro lado, para obtener una estimación correcta de la potencia de blanco de una determinada especie o grupo de peces, éstos han de estar suficientemente separados entre ellos para ser analizados como detecciones individuales, provenientes de un único ejemplar. Este proceso puede llevarse a cabo mediante distintos métodos. El detector de ecos individuales, que será explicado con detenimiento en el capítulo II.4, atiende a criterios de amplitud y duración pulso recibido para decidir si un eco proviene de un único pez. El análisis mediante trazas hace uso de la información angular para realizar un seguimiento de la trayectoria del blanco y determinar si ésta es coherente con el desplazamiento de un pez. Otros

métodos más recientes, como el detector crossfilter, presentado en [12], hacen uso de técnicas de procesado de imagen para la discriminación de ecos superpuestos y ruido.

Actualmente existen en el mercado cuatro tipos de ecosondas científicas, atendiendo al número de canales de emisión-recepción de los que disponen. Su funcionamiento es el descrito anteriormente con algunas diferencias que se citan a continuación. El sistema más básico y por tanto, más económico, es el de haz simple o single-beam. Este tipo de sistema cuenta con un solo canal de emisión-recepción, por lo que no es posible determinar la posición relativa del blanco respecto del haz de emisión, y la estimación de la potencia de blanco no puede realizarse de manera directa, siendo necesario recurrir a técnicas indirectas basadas en el análisis estadístico de los datos para hacerlo. El sistema de haz doble o dual-beam fue introducido originalmente por John Ehrenberg en [14] y desarrollado posteriormente por otros investigadores antes de ser comercializado por la empresa norteamericana Biosonics Inc. en un sistema basado en procesado digital de la señal. Este sistema emplea dos transductores montados concéntricamente, de manera que la emisión se efectúa por medio del transductor más pequeño y la recepción se realiza empleando los dos canales, lo que permite estimar el ángulo de incidencia de los blancos detectados y por tanto compensar el efecto de la posición del blanco en el haz de forma directa. Otro de los sistemas empleados es el de haz dividido o split-beam. Este sistema ha sido desarrollado y comercializado por la empresa noruega Simrad en las ecosondas de la serie EY y EK, entre otras. Este sistema usa una configuración más compleja que su antecesora, la ecosonda de haz doble. En este caso se emplea un único transductor circular dividido electrónicamente en cuatro cuadrantes, de forma que durante la emisión trabajan todos ellos con la misma amplitud y fase. En recepción se emplean los cuatro canales por separado, recibiendo los ecos cada canal de forma independiente. Esta información se emplea posteriormente para obtener los valores angulares y compensar el efecto de directividad del haz. El último de los sistemas existentes son los sistemas multihaz o multi-beam. Estos aumentan considerablemente el número de canales y la complejidad del procesado de señal posterior, lo que incrementa enormemente el coste económico de éstos respecto de los tres sistemas anteriores. Además, este tipo de sistemas no se emplean habitualmente para la estimación de la potencia de blanco de peces por lo que no se describe aquí su funcionamiento.

### *II.1. Target Strength.*

Las propiedades acústicas de cualquier objeto sumergido, entre los que se incluyen los peces, se describen mediante la potencia de blanco o target strength (TS). Ésta se define como la medida logarítmica de la proporción de energía incidente que se dispersa de vuelta en dirección al transductor, llamada sección transversal de dispersión en la dirección de vuelta o backscattering cross section.

$$TS = 10 * \log\left(r_{1m}^2\right) \frac{I_{bs}(1m)}{I_i} (dB) \quad (1)$$

Siendo  $r_{1m}^2$  la distancia de referencia, que fija la dimensión de la sección transversal de dispersión ( $m^2$ ),  $I_i$  la intensidad incidente en el blanco e  $I_{bs}(1m)$  la intensidad dispersada de vuelta a 1m del blanco. Esta última depende de la forma y tamaño del blanco, su reflectividad y de la frecuencia. Además se considera que la onda incidente es localmente plana y que la onda dispersada es esférica.

La intensidad dispersada por el blanco en todas direcciones cuando se tiene una fuente isotrópica que radia de forma omnidireccional es:

$$I_s(\theta_s, r_{1m}) = \frac{P_i(\theta_i)}{4\pi \cdot r_{1m}^2} (W/m^2) \quad (2)$$

Y la sección transversal de dispersión, en todas direcciones se define como:

$$\sigma_s(\theta_i, \theta_s) = \frac{I_s(\theta_s, r_{1m})}{I_i(\theta_i)} r_{1m}^2 (m^2) \quad (3)$$

En el caso de la sección transversal de dispersión en la dirección de vuelta o backscattering cross section se tiene:

$$\sigma_{bs}(\theta_i) = \frac{I_s(\theta_i, r_{1m})}{I_i(\theta_i)} r_{1m}^2 (m^2) \quad (4)$$

Por lo tanto, la potencia de blanco se puede expresar también como medida logarítmica de la sección transversal de dispersión en la dirección de vuelta:

$$TS = 10 * \log \frac{\sigma_{bs}(\theta_i)}{r_{1m}^2} (dB) \quad (5)$$

Si se tiene un blanco con dispersión isotrópica se tiene:

$$TS = 10 * \log \frac{\sigma_s(\theta_i)}{4\pi \cdot r_{1m}^2} (dB) \quad (6)$$

La sección transversal de dispersión en la dirección de vuelta se expresa en  $m^2$  y es directamente proporcional a la intensidad de la onda acústica  $I$  o a la presión acústica al cuadrado  $p^2$ .

Cuando se trata de peces, la potencia de blanco depende del comportamiento del pez, en especial de la orientación del cuerpo dentro del haz de emisión, caracterizado por la función de directividad del pez, ya sea en su parte dorsal o en la ventral. También depende, en aquellas especies que cuentan con vejiga natatoria, como la dorada, besugo, lubina, atún, salmón y arenque, entre otros, de la forma y orientación de ésta, que puede ser muy diferente para peces con aspecto

externo muy similar. Todo esto hace que resulte complicada una estimación teórica fiable de la potencia de blanco, de manera que la obtención de su valor se realiza experimentalmente o a partir de integraciones numéricas de modelos tridimensionales del pez. Considerando una única especie con ejemplares del mismo tamaño, la variabilidad de la potencia de blanco es bastante elevada debido a las dependencias comentadas. Por consiguiente, resulta apropiado considerar la potencia de blanco como un parámetro estocástico, lo que significa que estará determinado por una distribución de valores y su valor medio será el promedio de un gran número de mediciones.

A la hora de realizar una medición experimental de la potencia de blanco de peces, resulta de vital importancia tener en consideración las distancias de medición en relación a las de campo cercano tanto del transductor cómo del blanco que se desea evaluar. La potencia de blanco está definida en la zona de campo lejano del transductor y del blanco, más allá de sus respectivas zonas de campo cercano.

La zona de campo cercano del transductor se define por medio de su rango límite:

$$R_{N,Transductor} = \frac{d^2}{\lambda} (m) \quad (7)$$

Siendo  $d$  el radio del transductor o su dimensión lineal máxima en caso de no ser circular y  $\lambda$  la longitud de onda. Para distancias mayores que  $R_N$ , la presión acústica transmitida decrece inversamente con la distancia.

Análogamente, la zona de campo cercano del blanco se define:

$$R_{N,Blanco} = \frac{l^2}{\lambda} (m) \quad (8)$$

Siendo  $l$  la dimensión lineal máxima del blanco, que en el caso de peces se trata de la longitud del pez, aunque el hecho de que la vejiga natatoria sea la responsable de la reflexión de la mayor parte de la energía hace que pueda resultar adecuado considerar la longitud de la vejiga natatoria en lugar de la del pez completo.

Se han llevado a cabo numerosos estudios con el objetivo de definir experimentalmente una relación entre la potencia del blanco y la longitud de diferentes especies de peces, principalmente atendiendo al caso dorsal [4], [5]. En los últimos años, con el aumento de la producción de ciertas especies granjas marinas, se han efectuado estudios más recientes tratando de establecer esta relación a través de mediciones ventrales [13], [15].

La dependencia entre potencia de blanco y longitud del pez es válida en aquel rango de frecuencias en el que se tiene dispersión geométrica, lo que se da para peces relativamente grandes ( $L/\lambda \gg 1$ ) o para elevadas frecuencias. La dependencia de la potencia de blanco TS con la longitud del pez  $L$  es lineal en escala logarítmica y puede expresarse como:

$$TS = m \cdot \log \frac{l}{l_0} + b_m (dB) \quad (9)$$

Donde  $m$  es un coeficiente de proporcionalidad,  $l_0$  es la longitud de referencia (1m), y el valor  $b_0$  tiene dos componentes: una es constante y la otra depende ligeramente de la frecuencia, aunque a menudo el valor de ésta segunda componente es despreciable. Según los resultados de la mayoría de los estudios realizados hasta la fecha, el valor de  $m$  suele estar próximo a 20, como dato general, si bien su valor es dependiente de la especie por lo que pueden encontrarse diferentes valores en la literatura.

## II.2. Ecuación del sónar

Las ecosondas científicas registran datos que permiten conocer el tiempo de que transcurre entre la transmisión y la recepción de un eco así como el nivel de intensidad de éste. El tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción indica el rango o profundidad del blanco. El nivel de eco es la medida que permite estimar la abundancia de peces.

Este nivel de eco depende de la intensidad de la onda transmitida (source level, SL), las pérdidas por propagación debidas a la divergencia esférica y a la absorción (transmission loss, TL), la reflectividad del blanco (target strength, TS), la posición del blanco dentro del haz de emisión, caracterizada por la función de directividad del transductor (beam pattern, B), la ganancia del sistema receptor (gain, G) y otras pérdidas asociadas con la conversión de presión sonora a unidades eléctricas de tensión.

La relación existente entre la energía transmitida y la energía recibida en el transductor, que incluye todas las dependencias comentadas se describe mediante la ecuación del Sonar:

$$EL = [SL + B(\theta) - TL] + TS + [G + B(\theta) - TL] \quad (10)$$

$$8 \quad 1,2 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 6,7 \quad 6 \quad 5$$

Expresada de esta forma, la ecuación del sónar muestra los términos separados, por un lado aquellos relacionados con la transmisión y por el otro aquellos relacionados con la recepción de la señal, como puede verse en la Figura 1.

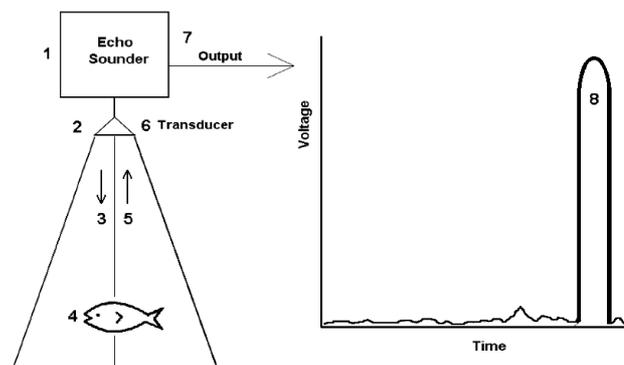


Figura 1. Relación entre la ecuación del sónar y el funcionamiento de una ecosonda.

Combinando los términos de la ecuación y agrupando aquellos correspondientes a las pérdidas por propagación, se tiene:

$$EL = SL + G - 2TL + TS + 2B(\theta) \quad (11)$$

El nivel de fuente es el nivel de intensidad generado por la fuente a una distancia de 1 m. En condiciones de campo lejano y régimen lineal se tiene:

$$SL = 10 \cdot \log \frac{\frac{W}{4\pi \cdot r_{1m}} \cdot Q(\theta, \psi)}{I_{ref}} = LW + DI(\theta, \psi) - 11(dB) \quad (12)$$

Siendo  $W$  la potencia de la fuente,  $Q$  el factor de directividad del transductor y  $I_{ref}$  la intensidad de referencia.

Las pérdidas por propagación se representan habitualmente por la divergencia geométrica del haz y la atenuación por la distancia. De forma logarítmica se expresan:

$$TL = 20 \cdot \log(R) + \alpha R \quad (13)$$

Habitualmente esta expresión resulta adecuada para evaluar las pérdidas, aunque en algunas aplicaciones se requiere una estimación más precisa adaptada a los modelos de propagación. En particular, es necesario cuando las variaciones espaciales de la velocidad de propagación producen la refracción de la trayectoria de la onda o cuando algunas interfaces generan trayectorias múltiples, no pudiendo utilizar la aproximación de ondas esféricas, como en este caso.

Una estimación fiable de la potencia de blanco de peces requiere algo más que un correcto registro de los ecos compensando el nivel detectado con las características del medio de propagación y del blanco. La energía de los ecos recibidos ha de ser convertida en el número de peces o en su densidad. Para ello existen dos técnicas de procesamiento de señal que estiman el número de objetos detectados por un sistema acústico: conteo de ecos e integración de ecos. El conteo de ecos consiste en la obtención de ecos de peces individuales con un nivel superior al umbral de tensión establecido, que son contados y relacionados con el volumen del haz de emisión. El principal requerimiento de esta técnica es la necesidad de una resolución tal que permita identificar blancos individuales. La capacidad para identificar blancos individuales depende de la geometría del haz emitido y de la longitud del pulso. Una mayor resolución vendrá dada por el uso de haces muy estrechos emitiendo pulsos de corta longitud. Esta técnica resulta apropiada en multitud de aplicaciones en las que la densidad de peces no sea elevada.

Sin embargo, cuando la concentración de peces es elevada, como es preceptivo a la hora de estimar la densidad de un banco de peces en alta mar, por ejemplo, es obligado recurrir al método de integración de ecos, que mide la energía total reflejada por una concentración de peces. El número de individuos se estima dividiendo la energía total reflejada por la energía asociada a un único pez.

### *II.3. Métodos de estimación del TS*

Los métodos de estimación de la potencia de blanco de peces pueden clasificarse en dos grandes grupos, atendiendo al emplazamiento de los peces durante la medición. Por un lado, las mediciones “ex situ” de peces en condiciones controladas, ya sean anestesiados o confinados en una jaula marina y por otro lado, las mediciones “in situ” de peces libres en su hábitat natural.

#### *II.3.1. Estimación de la potencia de blanco “Ex situ” e “In situ”*

La realización de mediciones “ex situ” de la potencia de blanco tiene la ventaja del conocimiento que se tiene del blanco, contrariamente a lo que ocurre habitualmente al realizar una medición “in situ”. Las mediciones “ex situ” pueden separarse en dos categorías: mediciones de peces sujetos y mediciones de peces en jaula marina.

Mediante sujeciones, el pez, anestesiado o no, se suspende en una posición conocida respecto del haz de emisión, de forma que la dependencia de la potencia de blanco con la orientación del pez se elimina. Conocida esta dependencia, la medida del nivel de eco permite estimar directamente la potencia de blanco aplicando la ecuación del sonar. La descripción de ésta dependencia entre la orientación del pez y la potencia de blanco ha sido el principal objetivo de ésta técnica de medida.

Recientemente, con el aumento exponencial de la producción de peces provenientes de granjas marinas, se ha popularizado la realización de mediciones de la potencia de blanco de peces en jaula marina. Además, la presencia de vejiga natatoria en numerosas especies de peces empleadas en acuicultura marina, unido al hecho de que éste órgano sea el responsable de la mayor parte de la energía reflejada por el pez, ha provocado la realización de medidas ventrales, colocando los transductores en el fondo de la jaula, emitiendo en dirección hacia la superficie.[13], [15].

Las mediciones “in situ” se realizan en el mar, con los peces en su hábitat natural, sin ningún tipo de perturbación en el estado fisiológico del pez durante la medición. Son mediciones dorsales y a diferencia de las mediciones “ex situ” se desconoce el blanco que se va a medir, y puede contarse con la presencia de numerosos tipos de blancos, incluyendo ejemplares de distintas especies y tamaños o ejemplares con distinto peso para una misma especie.

Los resultados obtenidos para la potencia de blanco empleando métodos de medida “ex situ” no son similares a los obtenidos siguiendo métodos “in situ”, existiendo algunas diferencias en las estimaciones debido al cambio de entorno. El origen de las diferencias existentes radica en el hecho de que el valor de la potencia de blanco también depende de una serie de parámetros como son la migración vertical, la orientación del pez y su comportamiento. En particular, debido a la migración vertical se producen los mayores cambios en los valores de la potencia de blanco. Como es sabido, los peces con vejiga natatoria emplean ésta para controlar su flotabilidad, mediante cambios en la densidad del gas que contiene en su interior. Estos cambios de densidad afectan

directamente a la reflexión provocada por éstos cuando son insonificados por un pulso acústico, provocando cambios en el valor de potencia de blanco resultante. En resumen, un pez extraído de su hábitat natural e introducido en el agua para realizar una medición controlada ha de adaptarse a las nuevas condiciones, lo que provoca ciertos cambios en los resultados obtenidos.

### *II.3.2. Estimación directa de la potencia de blanco*

Los métodos directos de estimación de la potencia de blanco permiten eliminar el efecto de la posición aleatoria del pez dentro del haz para cada eco individual. Dos son los métodos empleados en pesquería: el de haz doble y el de haz dividido. Ambos métodos se diferencian en la forma de obtener la información angular para eliminar el efecto del patrón de radiación. En el primer caso, el método de haz doble, se emplea la amplitud, por el contrario, el método de haz dividido hace uso de información angular para lograrlo.

El método de haz doble emplea dos transductores circulares, montados de forma concéntrica. La señal se transmite únicamente por el transductor estrecho, pero los ecos se reciben simultáneamente por los dos transductores. Así, se dispone de dos señales de eco recibidas que tienen en común el patrón de radiación del transductor en emisión, de manera que mediante el empleo de la ecuación del sonar para cada uno de los canales se puede eliminar esta dependencia. Sin embargo, las estimaciones de la potencia de blanco empleando este método tienen asociado un pequeño error relacionado con el patrón de radiación del transductor más ancho, que provoca que para un blanco de un determinado tamaño, sea más difícil registrar un eco si éste está alejado del eje de máxima radiación que si encuentra en él. Versiones recientes de este método incorporan un umbral angular que restringe aquellos ecos alejados del eje de máxima radiación, lo que reduce el error en la estimación de la potencia de blanco. Sin embargo, al aplicar un umbral se reduce el volumen efectivo de muestreo y con ello también lo hace el número de ecos registrados, por lo que será necesario un mayor número de detecciones para evitar un aumento de la varianza.

El método de haz dividido es más reciente que el anterior. Se emplea un único transductor circular, separado electrónicamente en cuatro cuadrantes, de manera que en emisión los cuatro trabajan al unísono, emitiendo con la misma amplitud y fase. En recepción se emplean los cuatro canales por separado y las diferencias de fase existentes entre los canales se emplea para extraer los valores angulares, o lo que es lo mismo, la ubicación del blanco dentro del haz emitido. Este método ofrece unas estimaciones de la potencia de blanco con un error menor que el del método de haz doble, si bien existe un pequeño error en la estimación de los ángulos y por tanto en la de la potencia de blanco. Además, este método permite implementar algoritmos de seguimiento del pez (tracking) con mayor facilidad, ya que es capaz de determinar la posición del pez de forma tridimensional.

### II.3.3. Estimación indirecta de la potencia de blanco. Ecuación integral de haz simple

Los métodos indirectos de estimación de la potencia de blanco emplean los datos procedentes de ecosondas de haz simple, que únicamente emplean un transductor con un solo canal, por lo que son los métodos menos costosos a nivel de hardware. La estimación de la potencia de blanco se realiza estadísticamente, estimando la función densidad de probabilidad, por lo que se requiere un número muy elevado de ecos individuales registrados para minimizar el error.

Este tipo de método puede dividirse en dos grupos: paramétricos y no paramétricos. Los primeros estiman algunos parámetros de la función densidad de probabilidad, mientras que los segundos tratan de estimar la función densidad de probabilidad completa.

Los primeros métodos paramétricos fueron obra de Petersen y Clay [16] que emplearon la distribución de Rayleigh para estimar la función densidad de probabilidad de la potencia de blanco en dominio lineal. Posteriormente otros autores han desarrollado otros métodos paramétricos, como es el caso de Ehrenberg [14].

Los métodos no paramétricos más conocidos son el de Craig & Forbes [17] que transforma la ecuación integral de haz simple en una serie de ecuaciones lineales que se resuelven recursivamente, logrando eliminar la dependencia del patrón de directividad del transductor. Sin embargo, este método, pionero, resulta ser numéricamente inestable, lo que provoca la obtención de valores negativos de la función densidad de probabilidad calculada. Con el paso de los años han ido surgiendo otros métodos no paramétricos, como el de deconvolución, presentado por Clay en [18]. Otros métodos más recientes hacen uso de técnicas inversas para extraer la función densidad de probabilidad de la potencia de blanco, partiendo de la ecuación integral de haz simple. Entre estos pueden citarse los métodos de regularización, los métodos de decomposición y los métodos de inferencia y maximización.

El empleo de los métodos no paramétricos obliga a asumir que los ecos adquiridos provenientes de un pez pueden ser tratados como un proceso estocástico, en consecuencia, tanto la intensidad como la presión pueden expresarse como el producto de variables aleatorias. Esto, extrapolado al dominio logarítmico, significa que la ecuación del sonar puede reducirse a tres únicos términos, que serán la potencia de blanco y el patrón de directividad del transductor, por un lado, y el nivel de eco normalizado por otro. El término normalizado se refiere en este caso a la eliminación de las dependencias relacionadas con la propagación, el nivel de fuente y la ganancia del receptor, de manera que en dominio logarítmico, la ecuación del sonar se ve reducida a la siguiente expresión:

$$E = B + TS \quad (14)$$

La función densidad de probabilidad de la suma de dos variables aleatorias independientes  $z = x+y$  es la convolución de las funciones densidad de probabilidad de sus componentes:

$$p_z(z) = \int_{-\infty}^{\infty} p_x(x) * p_y(z-x) dx \quad (15)$$

Empleando las variables acústicas en dominio logarítmico E, B y TS, esta expresión se convierte en la ecuación integral de haz simple:

$$p_E(z) = \int_{-\infty}^{\infty} p_B(x) * p_{TS}(z-x) dx \quad (16)$$

#### *II.4. Detección de ecos individuales*

Cuando se transmite un pulso acústico con una duración determinada y éste rebota con un objeto sumergido, el pulso reflejado verá modificada su amplitud y duración. Cuando se refleja contra el fondo, por ejemplo, el pulso recibido tendrá una gran amplitud y duración si se compara con el que se obtendrá cuando sea un pez el causante de la reflexión. Además, si dos peces se encuentran separados a una distancia menor que la resolución del sistema (determinada por la frecuencia y duración del pulso) el pulso recibido también tendrá una longitud superior a la del pulso emitido.

Los detectores de ecos individuales se utilizan para discriminar entre todas las detecciones registradas en cada transmisión, aquellas detecciones que no provengan de blancos individuales. Esto incluye ecos del fondo o la superficie, ecos superpuestos de varios blancos en un rango similar o cualquier otra detección que pueda ser considerada como ruido o interferencia por no provenir del blanco que se desea medir. Estos detectores están formados por distintos filtros que seleccionan los ecos que han de almacenarse para la posterior estimación de la potencia de blanco. Los filtros emplean criterios relacionados con la amplitud y longitud de los pulsos recibidos, comparando éstos con el pulso emitido para decidir si un eco ha de ser admitido como eco individual o eliminado del análisis. En sistemas de haz dividido, estos detectores incorporan también filtros relacionados con la posición del blanco dentro del haz de emisión, de manera que el análisis pueda restringirse únicamente a zonas próximas al eje de máxima radiación. La figura 2 incluye una representación de la señal de eco incluyendo la recepción de pulsos de distinta longitud y origen.

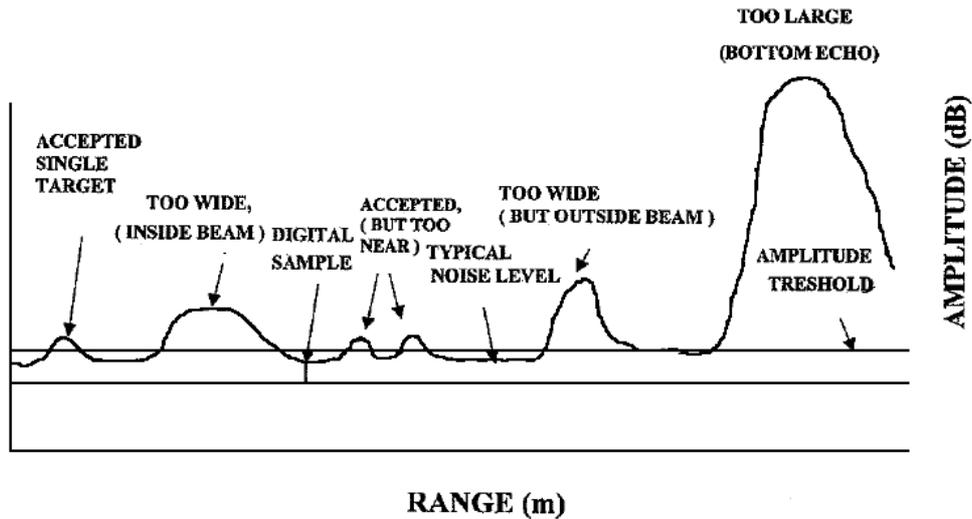


Figura 2. Diagrama esquemático de la señal de eco [8].

Este tipo de detectores ofrecen buenos resultados cuando la densidad de peces no es elevada, lo que permite que los peces estén suficientemente separados. En caso contrario, resulta necesario recurrir a otros métodos como la integración de ecos, analizando los blancos que se encuentran en un volumen determinado por el pulso emitido, lo que conlleva ciertos cambios en la ecuación del sonar que no son recogidos en este estudio. Los algoritmos y criterios de análisis desarrollados en este trabajo se centran en el uso de ecosondas single beam en jaula marina con baja densidad de peces, por lo que se emplea detección de ecos individuales y los filtros que se describen a continuación son aquellos relativos a criterios de amplitud y longitud del pulso recibido.

Los señal de entrada al detector de ecos simples en cada transmisión es la señal de eco registrada por la ecosonda en formato .raw (formato habitual de los ficheros procedentes de ecosondas Simrad). Además, se muestrea a una frecuencia tal que permita una buena reproducción de la señal, y se corrigen los efectos del nivel de la fuente, ganancia del receptor y las pérdidas por propagación mediante la función TVG (Time varying gain).

El proceso de detección de ecos individuales comienza después de cada transmisión, de forma que aquellos ecos cuyo nivel de señal esté por debajo de un umbral ( $TS_{min}$ ) fijado por el usuario son eliminados de la matriz de análisis. A continuación, el algoritmo busca los picos locales de la señal de eco y se estima la duración de cada eco en número de muestras, de forma que el comienzo y fin de cada eco lo constituyen las primeras muestras que tengan un nivel de 6 dB inferior a la del pico. La longitud del eco se estima en número de muestras de la misma forma que la del pulso transmitido. Aquellos ecos cuya longitud, relativa a la del pulso transmitido, no llegue a la mínima ( $E_{min}$ ) o exceda la máxima ( $E_{max}$ ) serán eliminados (ver Figura 3). Además, aquellos ecos que cumplan con los criterios de longitud impuestos, son revisados buscando la existencia de picos múltiples, permitiéndose la existencia de picos múltiples en un eco si la diferencia existente entre cada uno de ellos y el mínimo local existente entre ambos es inferior a 1,5 dB.

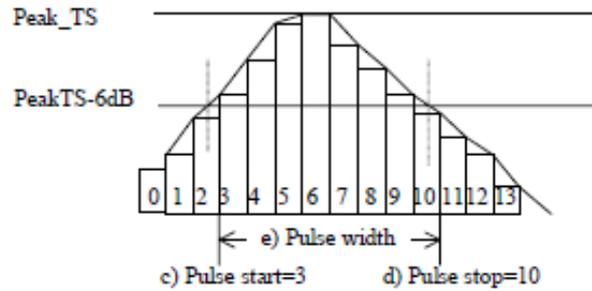


Figura 3. Determinación de la longitud del eco muestreado. El comienzo del pulso se define como la primera muestra con 6 dB menos que el pico con nivel creciente. El final del pulso se define como la primera muestra con 6 dB menos que el pico con nivel decreciente. En este caso, la duración del pulso es  $E_{length}=10-3 = 7$

El último paso consiste en analizar la separación existente entre ecos que se encuentren próximos entre sí en rango vertical. Si la separación (nº de muestras o cm) es inferior a un valor prefijado por el usuario, ambos ecos serán eliminados del análisis. Este último filtro, al igual que el criterio de longitud del eco, persigue eliminar aquellos ecos superpuestos que no provienen de un único blanco.

La figura 4 incluye un diagrama de flujo del detector de ecos individuales desarrollado, con todos los filtros empleados, así como el funcionamiento del detector:

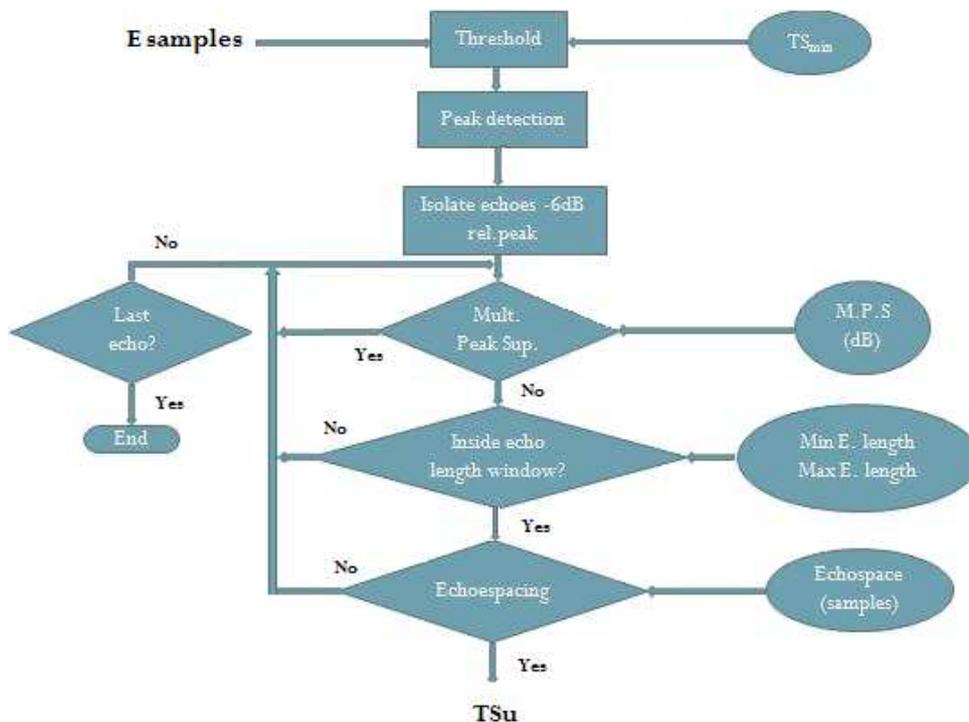


Figura 4. Diagrama de flujo del detector SED.

### III. MÉTODO ADAPTATIVO DE INFERENCIA, MAXIMIZACIÓN Y SUAVIZADO (AEMS)

Los métodos indirectos de estimación de la potencia de blanco emplean datos registrados con ecosondas de haz simple y, como se ha visto a lo largo del capítulo 2, permiten compensar el efecto del patrón de radiación del transductor sin disponer de información angular acerca de la posición relativa del pez respecto del haz emitido por el transductor. El primero de los métodos indirectos empleado para este fin fue presentado por Craig & Forbes [17]. Este resuelve la ecuación integral de haz simple, Ecuación 16, discretizando y reduciendo la ecuación a una serie de ecuaciones lineales que se resuelven recursivamente. Aunque ha sido aplicado con éxito en algunas aplicaciones, resulta numéricamente inestable y además, pueden llegar a obtenerse valores negativos en la función densidad de probabilidad calculada. Posteriormente, se han desarrollado nuevos métodos (Robinson, Ehrenberg, Clay y otros) capaces de reducir el error en la estimación de la potencia de blanco respecto a los métodos tradicionales, con estimaciones de la potencia de blanco próximas a las obtenidas a través de métodos directos con ecosondas de haz doble o haz dividido [19], [20].

El Método Adaptativo de Inferencia, Maximización y Suavizado, más conocido por su nombre en inglés “Adaptive Expectation Maximization and Smoothing method”, fue desarrollado y presentado por Marek Moszynski en [21] y ha sido testado y comparado con otros métodos indirectos existentes a la hora de estimar la potencia de blanco de peces de manera indirecta [28], [29]. Constituye una evolución del método EMS, desarrollado por John Hedgepeth y otros [22]. Este método tiene la ventaja de ser uno de que logra estimaciones de la potencia de blanco con menor error respecto a los métodos directos [23] por lo que constituye el algoritmo empleado en la aplicación de procesamiento objeto de este estudio. A lo largo de este capítulo se presentan los fundamentos del método y todas las consideraciones a tener en cuenta para aplicarlo correctamente.

#### III.1. Fundamentos del método

Este método se incluye dentro de los métodos indirectos no paramétricos. Estos métodos asumen que los ecos de peces registrados pueden ser tratados como un proceso estocástico, lo que reduce la ecuación del sonar en dominio logarítmico, Ecuación 14. Además, la aplicación del método AEMS exige el conocimiento del patrón de radiación del transductor.

La ecuación integral de haz simple (Ecuación 16), es discretizada para tratar la señal registrada y muestreada:

$$f_E(j) = \sum_{i=1}^n f_{TS}(i) \cdot f_B(j-i)\Delta i \quad (17)$$

Donde los índices  $i$  y  $j$  se corresponden con las clases de las distribuciones de TS y B (en dB), respectivamente. Además, la ecuación anterior es una ecuación lineal, por lo que puede presentarse en forma matricial:

$$z = K \cdot x \quad (18)$$

Donde K es la matriz núcleo de la ecuación y se obtiene a partir de B, z es un vector con la distribución de los ecos normalizados registrados y x es el vector buscado que representa la distribución de TS.

El algoritmo EMS, sin la inclusión de la parte adaptativa, realiza un número determinado de iteraciones en las que la solución final va modificando progresivamente su valor hasta completar el cálculo. Cada iteración lleva asociada la ejecución de tres pasos, inferencia, maximización y suavizado.

El primer paso estima la distribución de z como la esperanza condicionada o condicional:

$$z^{(n)} = E\left(z \mid \sum_{i=1}^n z_{ij}, x_{ij}^{(n)}\right) \quad (19)$$

El segundo paso toma los datos estimados para calcular las estimaciones de máxima similitud empleando la siguiente ecuación:

$$E(z_{ij} | x) = z^{(n)} \quad (20)$$

El último paso en cada iteración consiste en el suavizado de la solución x empleando una función Gaussiana:

$$x^{(n)} = \sum_j S_{ij} x^{(n)} \quad (21)$$

Donde S es la matriz de suavizado.

Por último, asumiendo que la distribución de los datos z provienen de una distribución de Poisson no homogénea, se obtiene una ecuación que describe los dos primeros pasos de la siguiente forma:

$$x^{(n)} = \frac{x^{(n-1)}}{\sum_i K_{ij}} \left( \frac{z^t}{x^{(n-1)} K^T} K \right) \quad (22)$$

El error obtenido en la estimación de la potencia de blanco empleando el método EMS puede reducirse introduciendo ciertos cambios en la aproximación del núcleo K de la ecuación integral, obtenido a partir del patrón de radiación del transductor. En esto consiste la parte adaptativa del algoritmo. Calculada la primera aproximación de la distribución de TS, se emplea ésta junto con la distribución de ecos registrada para obtener una nueva estimación del patrón de radiación del transductor, como puede verse con mayor claridad en la Figura 5. La nueva estimación del patrón de radiación permite construir un nuevo núcleo K y, tras aplicar de nuevo el algoritmo, obtener una estimación final de la potencia de blanco con un error aún menor.

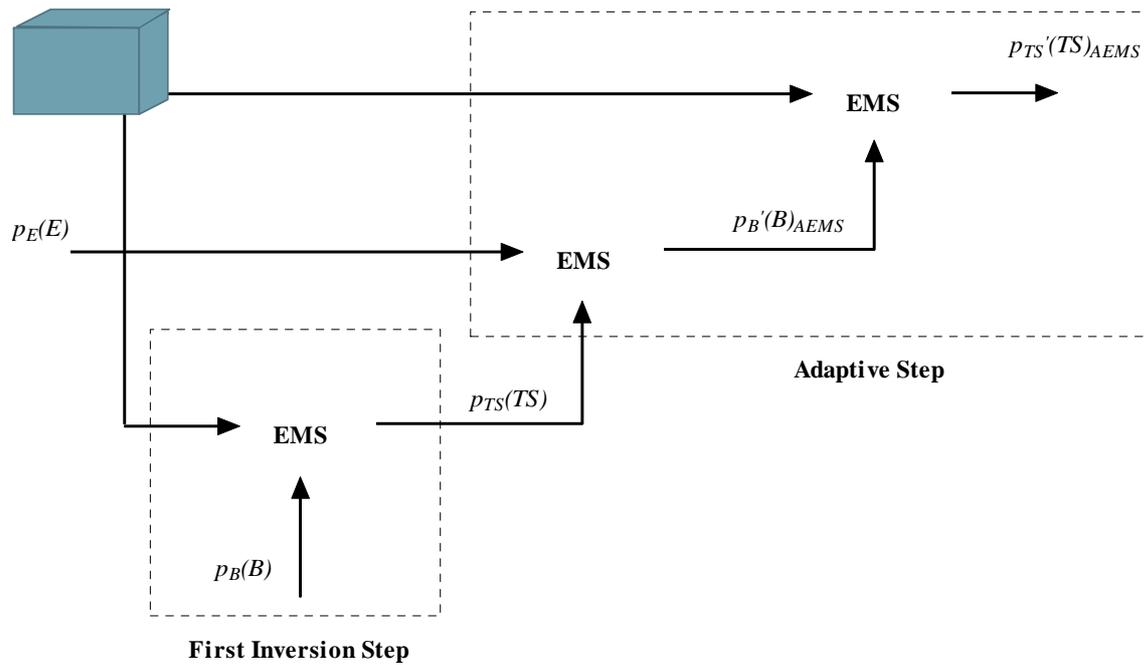


Figura 5. Diagrama esquemático del algoritmo AEMS.

### III.2. Determinación de la función distribución de probabilidad del patrón de radiación del transductor

El núcleo de la ecuación integral se obtiene a partir de la función distribución de probabilidad del patrón de radiación del transductor. A pesar de que este patrón se representa mediante una función determinista, en sentido estadístico es una función que transforma la posición aleatoria del pez dentro del haz en una nueva variable aleatoria combinando ésta con la posición relativa del pez observada por el haz del transductor. Teóricamente, la potencia de blanco no depende de su posición dentro del haz, por este motivo, ambas distribuciones pueden tratarse como variables aleatorias independientes. No obstante, como se verá posteriormente, debido a que los datos registrados están limitados por el umbral de detección del sistema, ambas variables pueden convertirse en dependientes.

El patrón de directividad y por ende, la función distribución de probabilidad del transductor puede obtenerse a partir de la directividad de un pistón circular ideal en pantalla infinita [23]. Sin embargo, en la práctica, el patrón de radiación en ecosondas comerciales con transductor circular puede diferir del obtenido teóricamente para un pistón circular. Moszynski emplea una aproximación bastante útil para el cálculo de la función distribución de probabilidad buscada [24]:

$$b(\theta) = \left( 1 - \left( 1 - 2^{-\gamma} \right) \frac{1 - \cos \theta}{1 - \cos \theta_{3dB}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (23)$$

Donde el coeficiente exponencial  $\gamma$  permite ajustar la forma de la curva al patrón de directividad real. La aproximación mostrada es válida para representar el lóbulo principal del patrón de directividad.

La expresión correspondiente en dominio logarítmico, considerando la ausencia de ecos múltiples:

$$p_B(B) = \frac{\ln 10}{20} \cdot \frac{\gamma}{1-2^{-\gamma}} \cdot \frac{1 - \cos \theta_{3dB}}{1 - \cos \theta_{\max}} 10^{\frac{\gamma B}{20}} \quad (24)$$

En caso de existencia de ecos múltiples la expresión se complica ligeramente:

$$p_B(B) = \frac{\ln 10}{20} \cdot \frac{\gamma}{1-2^{-\gamma}} \cdot \frac{1 - \cos \theta_{3dB}}{\tan^2(\theta_{\max})} \cdot K\left(\frac{\tan \theta}{\tan \theta_{\max}}\right) \cdot \frac{1}{\cos^3(\theta)} 10^{\frac{\gamma B}{20}} \quad (25)$$

Siendo  $K\left(\frac{\tan \theta}{\tan \theta_{\max}}\right)$  la integral elíptica completa de tipo 1 y  $\theta$  la posición angular, que se

calcula como la inversa de  $b(\theta)$ , de la Ecuación 26:

$$\theta = \arccos\left(\frac{1 - \left(1 - 10^{0.05 \cdot \gamma B}\right) \cdot (1 - \cos \theta_{3dB})}{1 - 2^{-\gamma}}\right) \quad (26)$$

Siendo  $\theta_{3dB}$  posición angular a -3 dB respecto del máximo y  $\theta_{\max}$  el ángulo máximo del patrón de radiación considerado en el cálculo.

Si el cálculo se realiza únicamente para el lóbulo principal, la función inversa del patrón de radiación tiene un único valor angular para cada valor de B. Sin embargo, si se incluyen los lóbulos laterales la función inversa tiene varios posibles valores angulares para cada valor de B, por lo tanto el cálculo habrá de realizarse para todos los ángulos  $\theta$  con el mismo valor de B. En la práctica es más sencillo trabajar sólo con el lóbulo principal ya que se simplifica la obtención de la PDF del patrón de radiación.

### III.3. Influencia del umbral en la ecuación integral de haz simple

Cuando se desea estimar la biomasa de peces, ya sea a través de una medición in situ o ex situ, el volumen de muestreo, fijado por el sistema de medida empleado, es de gran importancia debido a que en el caso de blancos distribuidos aleatoriamente la energía del eco recibida está relacionada linealmente con el volumen muestreado. Al aplicar un umbral buscando eliminar aquellas detecciones susceptibles de ser consideradas como ruido, el volumen muestreado efectivo se ve reducido respecto del volumen total del haz emitido.

Diversos autores han estudiado este problema, Foote [25] desarrolló una expresión que permite conocer el volumen efectivo de muestreo a partir de la directividad del transductor, la sección

transversal de dispersión en la dirección de vuelta del pez como una función del ángulo de inclinación del mismo y el umbral aplicado.

Analizando el problema desde un punto de vista estadístico y tomando como referencia la Ecuación 14, las variables aleatorias TS y B se tratan como variables aleatorias independientes, lo que permite expresar sus funciones distribución de probabilidad en la forma de una ecuación de integral de convolución:

$$p_E(E) = \int_{-\infty}^0 p_B(B) * p_{TS}(E - B) dB \quad (27)$$

En sistemas de haz simple, la introducción de un umbral de detección modifica únicamente el rango de integración de la integral de convolución.

$$p_E(E|E > E_{\min}) = \int_{E_{\min}-B}^0 p_B(B) * p_{TS}(E - B) dB \quad (28)$$

La función distribución de probabilidad de la potencia de blanco estimada no estará condicionada siempre que se escoja adecuadamente el rango de la función distribución del patrón de radiación.

A nivel práctico, como se verá posteriormente en el capítulo de resultados, se tiene una distribución de ecos registrados con un rango mínimo determinado por el umbral y máximo determinado por la detección de máximo nivel. El rango obtenido en la distribución de la potencia de blanco dependerá del rango anterior y del rango que se escoja para el patrón de radiación, de forma que la diferencia entre los rangos mínimos y máximos de las distribuciones de ecos y el patrón de radiación determinan el rango de la distribución de la potencia de blanco. Sirva como aclaración un ejemplo numérico;

Suponiendo un rango de -70 dB a -20dB para la distribución de ecos y un rango de -20 dB a 0 dB para la distribución del patrón de radiación, el rango de la distribución de la potencia de blanco obtenida como resultado del empleo de la integral de convolución anterior, Ecuación 28, será de -50 dB a -20 dB.

En sistemas de haz doble o haz dividido, donde se tiene un valor de potencia de blanco para cada valor de eco registrado, además de modificar el rango de integración se introduce dependencia entre las variables aleatorias TS y B, y la ecuación del sonar en dominio logarítmico se ve condicionada:

$$E' = B' + TS' \quad (29)$$

Las primas indican que las variables aleatorias son condicionadas o condicionales y las funciones distribución de probabilidad se expresan mediante distribuciones condicionadas:

$$p_{E'}(E') = p_E(E|E > E_{\min}) \quad (30)$$

$$p_{TS'}(TS') = p_{TS}(TS|E > E_{\min}) \quad (31)$$

$$p_{B'}(B') = p_B(B|E > E_{\min}) \quad (32)$$

#### IV. EVALUACIÓN DEL ALGORITMO

Con objeto de comprobar que los resultados obtenidos mediante la aplicación de procesado son los deseados, se emplea el software de procesado Sonar Pro 5.9.9 [11] como elemento de comparación. Este programa permite, entre otras funciones, el análisis de ecos mediante detector de ecos simples (conteo de ecos), siendo éste el mismo método que el implementado en la aplicación de procesado. Sonar Pro 5 permite calcular tanto la distribución de la potencia de blanco sin compensar (TSu) como la distribución de potencia de blanco (TS). La obtención de éste último se realiza directamente, en el caso split-beam, y de forma indirecta aplicando el método de Craig & Forbes [17] en el caso single-beam.

Se llevan a cabo diferentes análisis con los mismos datos, extraídos de unas mediciones experimentales de 5 clases de doradas de diferente tamaño para realizar las comparaciones. En primer lugar, se calculan las distribuciones de potencia de blanco sin compensar (TSu) empleando los datos sin información angular, cómo si provinieran de una ecosonda single-beam. Teniendo en cuenta que tanto Sonar Pro como la aplicación de procesado emplean el mismo método de análisis y los mismos filtros en el detector de ecos individuales, se pueden validar los resultados de la aplicación desarrollada hasta este punto. En segundo lugar, se calculan las distribuciones de la potencia de blanco (TS). Éstas se obtienen mediante análisis split-beam con Sonar Pro y mediante el uso de la técnica inversa AEMS (capítulo 3), en el caso single-beam, con la aplicación de procesado. Por último, una vez calculada la potencia de blanco de las distintas clases, se trata de establecer una relación entre la potencia de blanco y la longitud del pez.

Los valores de todos los parámetros involucrados en los análisis se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de los parámetros del detector de ecos individuales empleados durante los análisis.(1) Empleado únicamente en el caso split-beam.

Parámetro	Valor
Min. Target Size	-50, -60 <sup>(1)</sup> dB
Min Echo length	0.8
Max. Echo Length	1.8
Mult. Peak Suppression	1.5 dB
Min. Echoespacing	4 muestras
Max. Gain Compensation <sup>(1)</sup>	6 dB
Max Phase deviation <sup>(1)</sup>	8° (1 en Sonar Pro)
Capa de análisis	1-2 m

A la hora de calcular los valores promedios de la potencia de blanco, ya sea sin compensar o compensada, se realiza la conversión al dominio lineal para calcular los valores medios. También se realiza un ajuste lineal por mínimos cuadrados para hallar la relación entre la potencia de blanco y el logaritmo de la longitud del pez. Con esto se pretende verificar si se puede monitorizar el

crecimiento de las doradas mediante la potencia de blanco, así como la posibilidad realizarlo empleando únicamente la potencia de blanco sin compensar.

Se emplean dos versiones diferentes de la aplicación de procesado. La diferencia entre ambas radica en el orden en el que se aplican dos de los filtros existentes en el detector de ecos individuales, el umbral y el criterio de longitud de eco (ver Figura 4). Si se aplica el criterio de ecos en primer lugar, de forma similar al funcionamiento del Sonar Pro 5, la señal registrada no se modifica antes de pasar por el detector de ecos individuales y todos los ecos detectados tendrán una longitud acorde a la especificada a la salida del filtro de longitud de eco, pero la aplicación posterior del umbral puede provocar la obtención de ecos con una longitud inferior a la fijada en el criterio de longitud de ecos si alguno de los ecos individuales registrados cuenta con muestras por debajo del nivel del umbral. Si se aplica el umbral el primer lugar, como se sugiere en [8], todos los ecos almacenados para el análisis tendrán una longitud acorde a la especificada. Sin embargo, en este caso, la aplicación de un umbral demasiado elevado puede provocar la eliminación de ciertas muestras de ecos de bajo nivel (ecos fuera del eje de máxima radiación del transductor), disminuyendo su longitud y provocando que el filtro de longitud de ecos los rechace posteriormente, lo que reduce el número de detecciones válidas para el análisis.

#### IV.1. Mediciones empleadas para los análisis

Con objeto de desarrollar y verificar el correcto funcionamiento de la aplicación de procesado se analizan unas mediciones acústicas realizadas en jaula marina con anterioridad a la realización del presente estudio.

Las mediciones se realizaron con ejemplares de dorada caracterizados en 5 clases de tamaño diferentes para hallar la relación entre la potencia de blanco dorsal y ventral de éstos con su tamaño. Tanto las mediciones biométricas como las acústicas tuvieron lugar en julio de 2009.

En primer lugar, se midió la longitud y el peso de los diferentes ejemplares, previamente anestesiados, y se clasificaron en 5 clases de tamaño diferentes comprendidas entre 20 y 25 cm, de forma que la dispersión de longitud dentro de cada clase fuera lo menor posible. En la Tabla 2 se resumen la masa y la longitud total promedio de los especímenes de cada clase, así como el coeficiente de variación de la longitud total y el número de ejemplares en el interior de la jaula. La clasificación por tamaño cubre una gran parte de las tallas comerciales.

Tabla 2. Descripción de cada clase de tamaño de dorada

Clase	1	2	3	4	5
Nº ejemplares	2 - 4	2 - 4	2 - 8	2	2 - 4
Masa (g)	158.8	178.7	194.4	235.7	268.7
Long (cm)	20.3	21.1	21.7	23.1	24.2
CV Long (%)	0.25	0.42	0.51	0.55	0.42

Posteriormente, se midió de forma directa el TS ventral y dorsal de ejemplares individuales. Las medidas se llevaron a cabo en el puerto de Gandía (Valencia). Se introdujo un número reducido de ejemplares de cada una de las clases en una jaula de tamaño reducido (3 m de diámetro y 2.7 m de altura), evitando así el solapamiento de ecos procedentes de múltiples blancos que pudieran falsear las detecciones de ecos procedentes de un blanco individual y sobreestimar el TS medio [8]. Una vez introducidos los peces en la jaula, se les deja un cierto tiempo para que se habitúen a su nuevo entorno antes de comenzar las mediciones. Unos días antes de realizar las mediciones se dejó de suministrar alimento.

El sistema empleado durante las mediciones fue una ecosonda EK60 de Simrad con un transductor split beam de 7°, trabajando a 200 kHz y con el máximo del campo cercano próximo a 1 m, para la medida directa del TS. El transductor se monta en el centro de la jaula, en el fondo orientado verticalmente hacia arriba para medir el TS ventral y en superficie orientado hacia abajo para medir el TS dorsal (ver Figura 6). La potencia transmitida fue de 90 W, la longitud del pulso de 64  $\mu$ s y el intervalo entre pings de 20 ms. Durante las mediciones se realizó un seguimiento de la temperatura del agua. Antes de introducir los peces en la jaula y comenzar a medir, se calibró el transductor en el interior de la jaula empleando una esfera de calibración de cobre de 13.7 mm de diámetro [26].



Figura 6. Detalle de montaje del transductor en el fondo de la jaula.

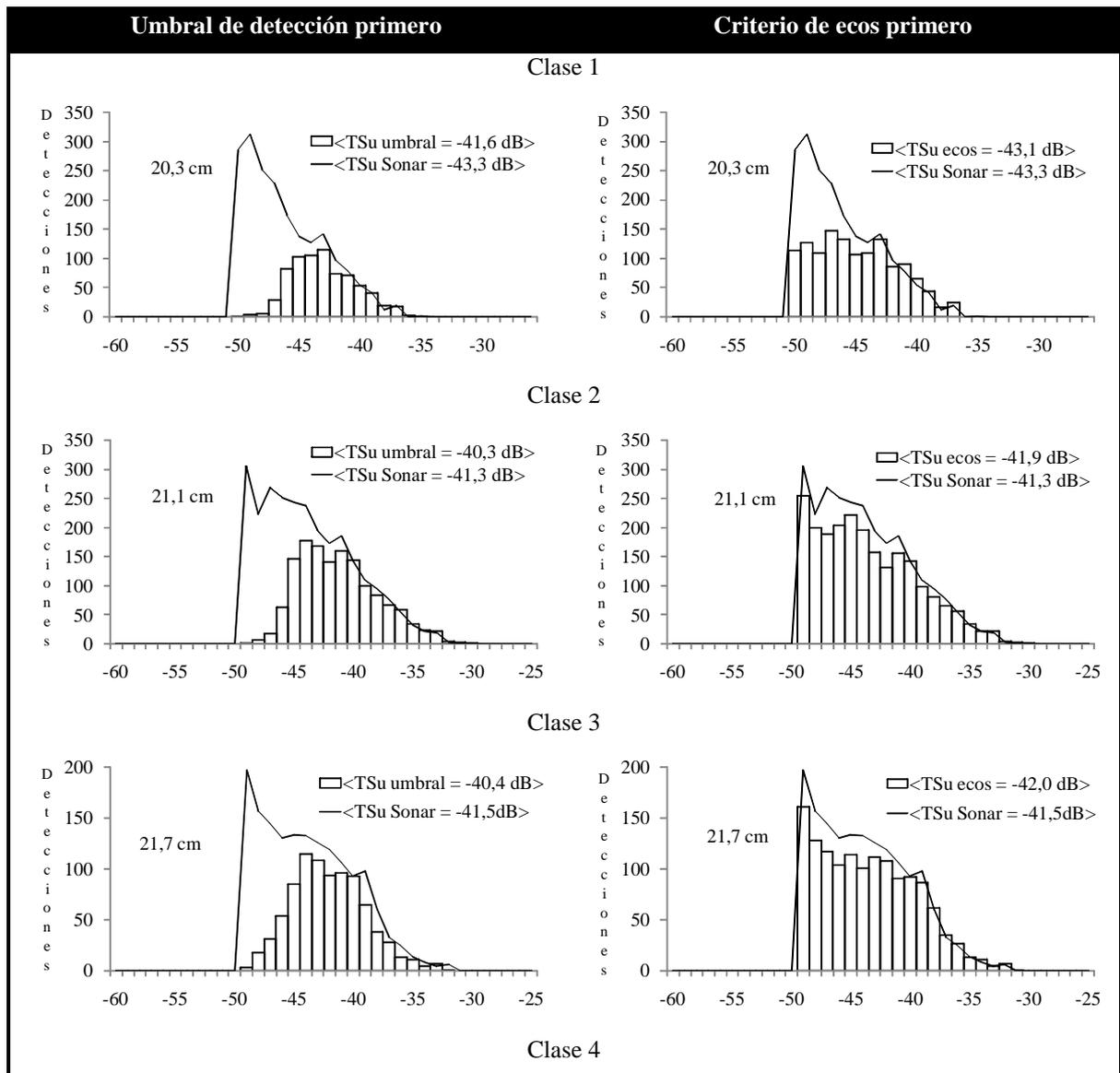
Se realizan medidas durante aproximadamente una hora para cada tipo de medida (dorsal, ventral) y clase de tamaño. Los datos registrados se almacenan en ficheros .raw para su posterior análisis.

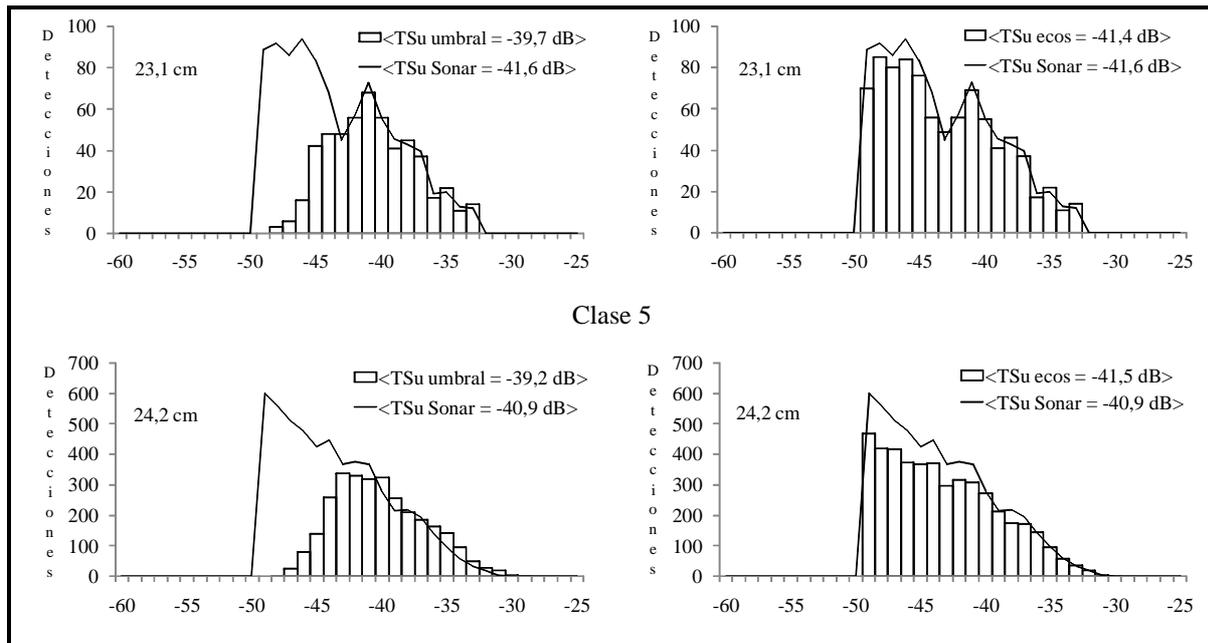
IV.2. Análisis single-beam

IV.2.1. Distribuciones de TS sin compensar

Los resultados obtenidos mediante el análisis por detección de ecos simples se muestran en la Tabla 3 para el caso ventral y en la Tabla 4 para el caso dorsal. Se presentan las distribuciones de la potencia de blanco sin compensar para las 5 clases de doradas, comparando las distribuciones de las dos versiones de la aplicación de procesado con las que se obtienen mediante el uso de Sonar Pro 5.

Tabla 3. Distribuciones de TSu para las 5 clases de doradas en el caso de medidas ventrales. Comparación entre Sonar Pro y las dos versiones de la aplicación de procesado.





En el caso de medidas ventrales, los resultados son satisfactorios en todas las clases estudiadas cuando se aplica primero el criterio de longitud de ecos y después el umbral (columna derecha en la Tabla 3), con distribuciones muy similares a las obtenidas mediante Sonar Pro en todos los casos salvo en la clase 1, y valores promedios de la potencia de blanco con diferencias iguales o menores a 0,5 dB. No obstante, las distribuciones obtenidas no son unimodales en ningún caso debido a la presencia de un número elevado de detecciones de bajo nivel en comparación con las de alto nivel, próximas al eje de máxima radiación del transductor. Las diferencias encontradas son debidas, principalmente, a la diferencia existente a la hora de calcular el nivel de cada eco individual. Sonar Pro5 toma todas las muestras de cada eco individual y realiza un ajuste lineal para estimar el valor máximo del eco, almacenando únicamente esa muestra para la distribución. Sin embargo, la aplicación de procesado toma directamente el valor máximo de cada eco que provoca la obtención de valores ligeramente inferiores que el Sonar Pro 5. El resultado final es que algunas detecciones de bajo nivel, próximo al umbral de detección, como es el caso de la clase 1, son eliminadas por la aplicación de procesado y no por Sonar Pro.

Cuando el procedimiento consiste en aplicar primero el umbral y luego el criterio de longitud de ecos (columna izquierda en la Tabla 3), de forma opuesta al procedimiento seguido por Sonar Pro 5, las distribuciones obtenidas siguen la misma tendencia que las que se obtienen con Sonar Pro 5 en niveles altos, pero la mayoría de las detecciones de bajo nivel son eliminadas, lo que facilita la obtención de distribuciones unimodales, así como la obtención de valores promedios superiores a los obtenidos con Sonar Pro 5.

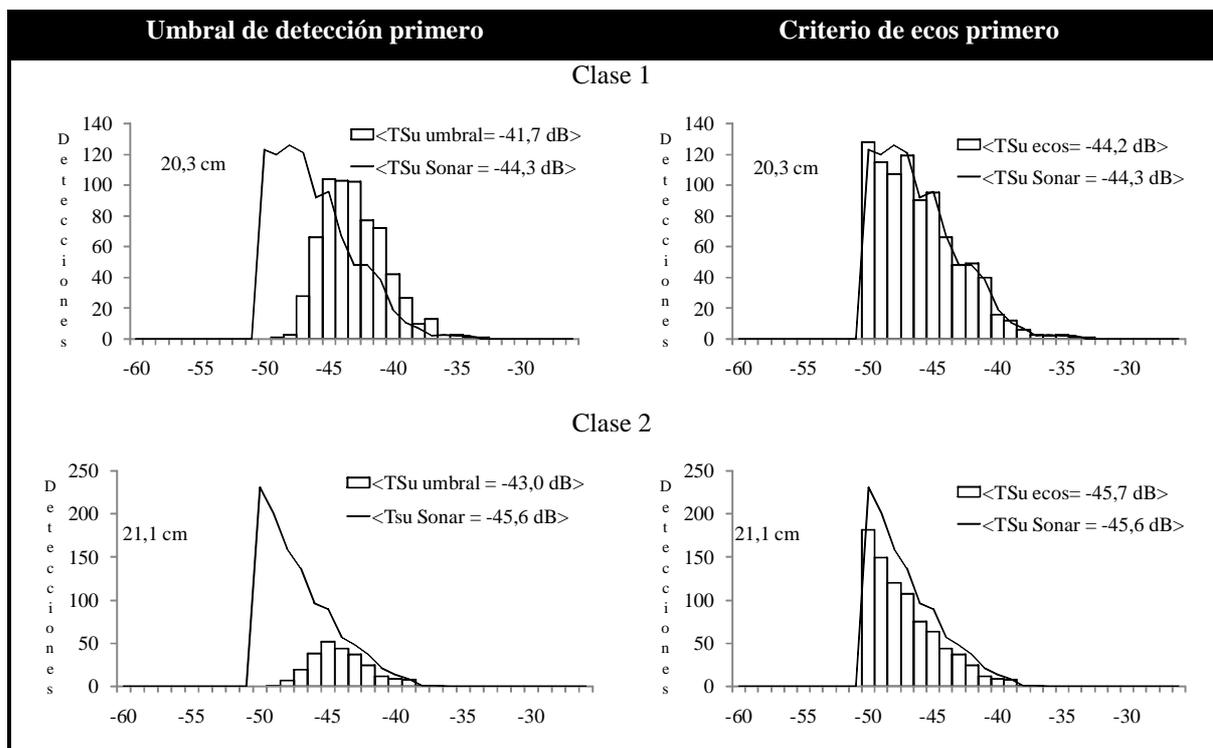
Por otro lado, el número de detecciones individuales registradas es muy bajo en todas las clases, tanto en medidas dorsales como en ventrales, por lo que la consecución de distribuciones

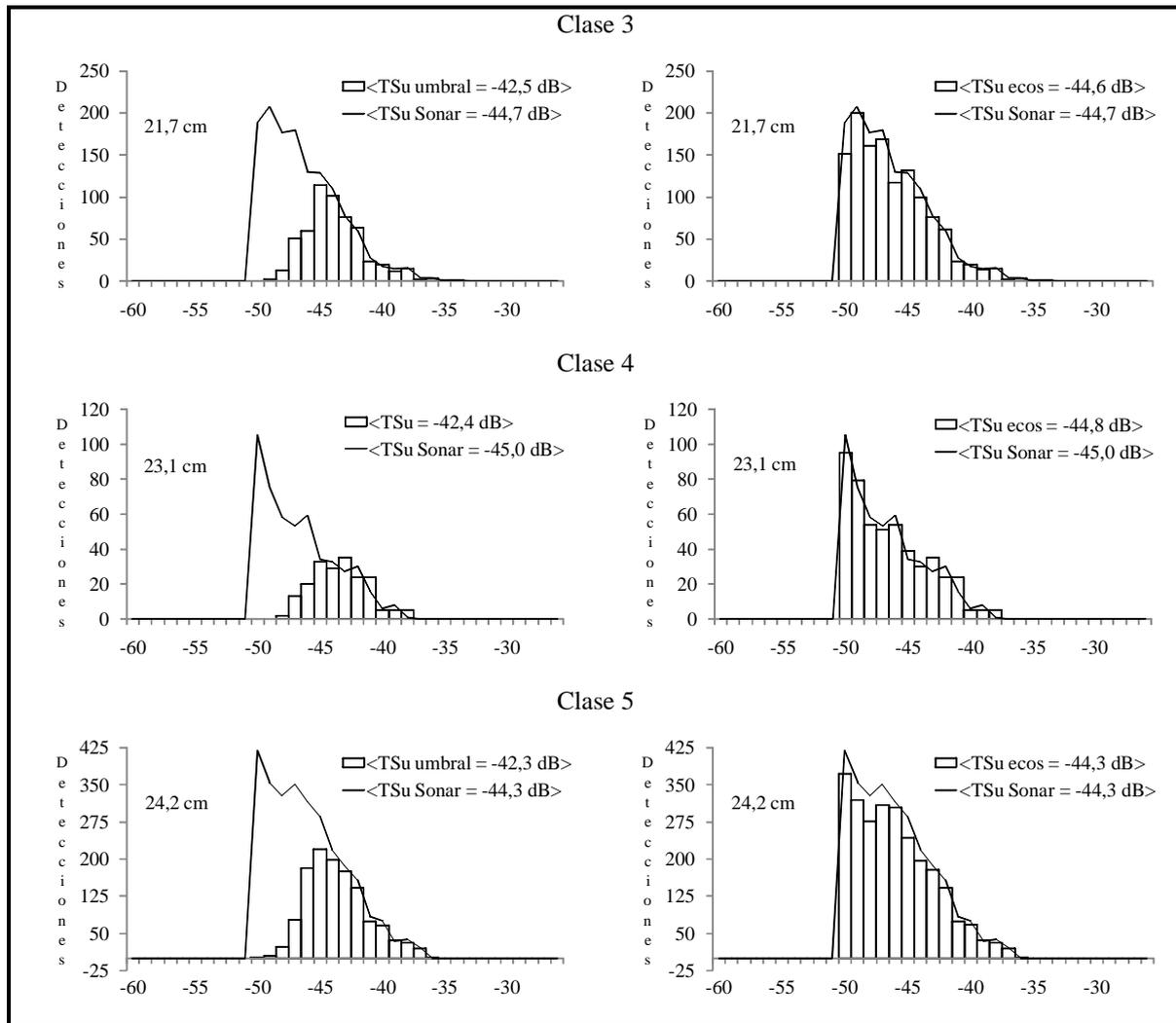
unimodales se complica enormemente, ya sea empleando Sonar Pro o cualquiera de las dos versiones de la aplicación de procesado.

En el caso de medidas dorsales los resultados son igualmente satisfactorios en las comparaciones entre Sonar Pro y la versión de la aplicación de procesado análoga a éste. Empleando esta versión, las distribuciones son prácticamente idénticas a las de Sonar en 4 de las 5 clases, con el mismo número de detecciones en la gran mayoría de clases de la distribución. La distribución de la clase 2 sigue la misma tendencia que la obtenida con Sonar pero el número de detecciones aceptadas como válidas es ligeramente inferior aunque el valor medio es el mismo. Este hecho se ha observado también en menor medida en el resto de clases analizadas con la aplicación de procesado al compararlo con el número de detecciones aceptadas por Sonar. La potencia de blanco promedio obtenida es prácticamente la misma que la obtenida mediante Sonar Pro, con diferencias menores de 0,2 dB y las distribuciones obtenidas no son unimodales en ningún caso, con predominio de detecciones de bajo nivel.

Al emplear la otra versión de la aplicación, aquella en la que primero se aplica el umbral y luego el criterio de longitud de eco se obtienen distribuciones más cercanas a una distribución unimodal, ya que la mayor parte de las detecciones de bajo nivel son eliminadas por el detector de ecos, aunque serían necesarias muchas más detecciones individuales registradas para lograrlo. Además, como era previsible, se tienen valores medios en torno a 3 dB superiores a los que se logran con Sonar Pro debido al uso del umbral antes que el criterio de longitud de eco.

Tabla 4. Distribuciones de TSu para las 5 clases de doradas en el caso de medidas dorsales. Comparación entre Sonar Pro y las dos versiones de la aplicación de procesado.





#### IV.2.2. Relación entre el TS sin compensar y la longitud del pez

La Figura 7 muestra la relación obtenida entre la potencia de blanco y el logaritmo de la longitud del pez tras realizar un ajuste lineal de los valores promedios obtenidos para las distintas clases en mediciones ventrales. Se obtiene una buena correlación entre potencia de blanco y longitud del pez cuando el umbral se aplica en primer lugar. Además, la pendiente y la ordenada en el origen tienen valores próximos a los existentes en la literatura, aunque los valores promedios están muy próximos entre las distintas clases, llegando incluso a ser superior el de la clase 2 que el de la clase 3, lo que complica el ajuste. La expresión obtenida en este caso es la siguiente:

$$TSu = 28,0 \log(L[cm]) - 77,8 \quad (33)$$

$$r^2 = 0,900$$

Cuando se utiliza Sonar Pro o la versión análoga a éste de la aplicación de procesamiento se obtienen correlaciones pobres, algo esperable debido a que las distribuciones obtenidas no eran unimodales y por lo tanto el valor promedio obtenido difícilmente puede ser representativo de la clase en cuestión. Además, existen ligeras diferencias entre ambas, tanto en la correlación obtenida

como en los valores del ajuste. A pesar de esto, la pendiente y la ordenada en el origen del ajuste se mueven dentro de un rango similar al mejor de los ajustes logrados.

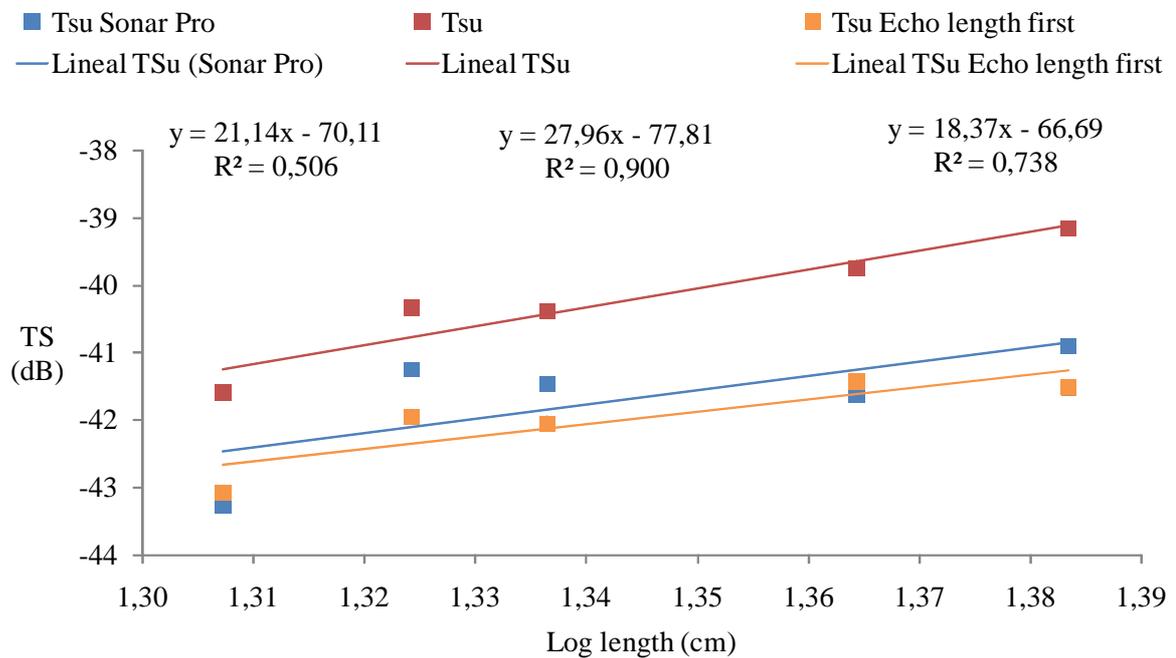


Figura 7. Relación entre el TSu y la longitud del pez para mediciones ventrales

Los ajustes realizados en el caso de mediciones dorsales no logran correlaciones satisfactorias en ninguno de los 3 análisis realizados. Los valores promedios fluctúan entre clases consecutivas al aplicar primero el criterio de longitud de ecos o mediante Sonar Pro y en todos los análisis el valor medio de la clase 1 es superior al resto.

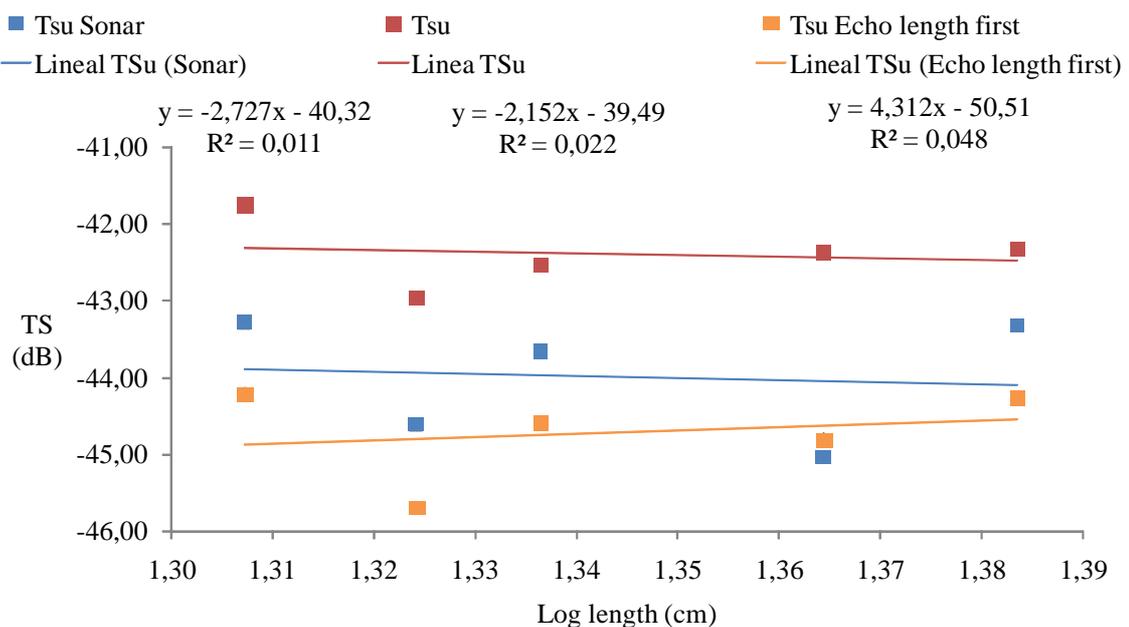


Figura 8. Relación entre el TSu y la longitud del pez para mediciones dorsales.

### *IV.3. Comparación de resultados. Split beam VS Single beam*

A partir de las distribuciones de la potencia de blanco sin compensar (TSu) obtenidas mediante análisis single-beam, se compensa el efecto de la posición del pez en el haz mediante el uso de la técnica inversa AEMS [21] para extraer el valor de la potencia de blanco (TS). Las distribuciones resultantes se comparan con las que se obtienen realizando un análisis split-beam para verificar la validez de los resultados.

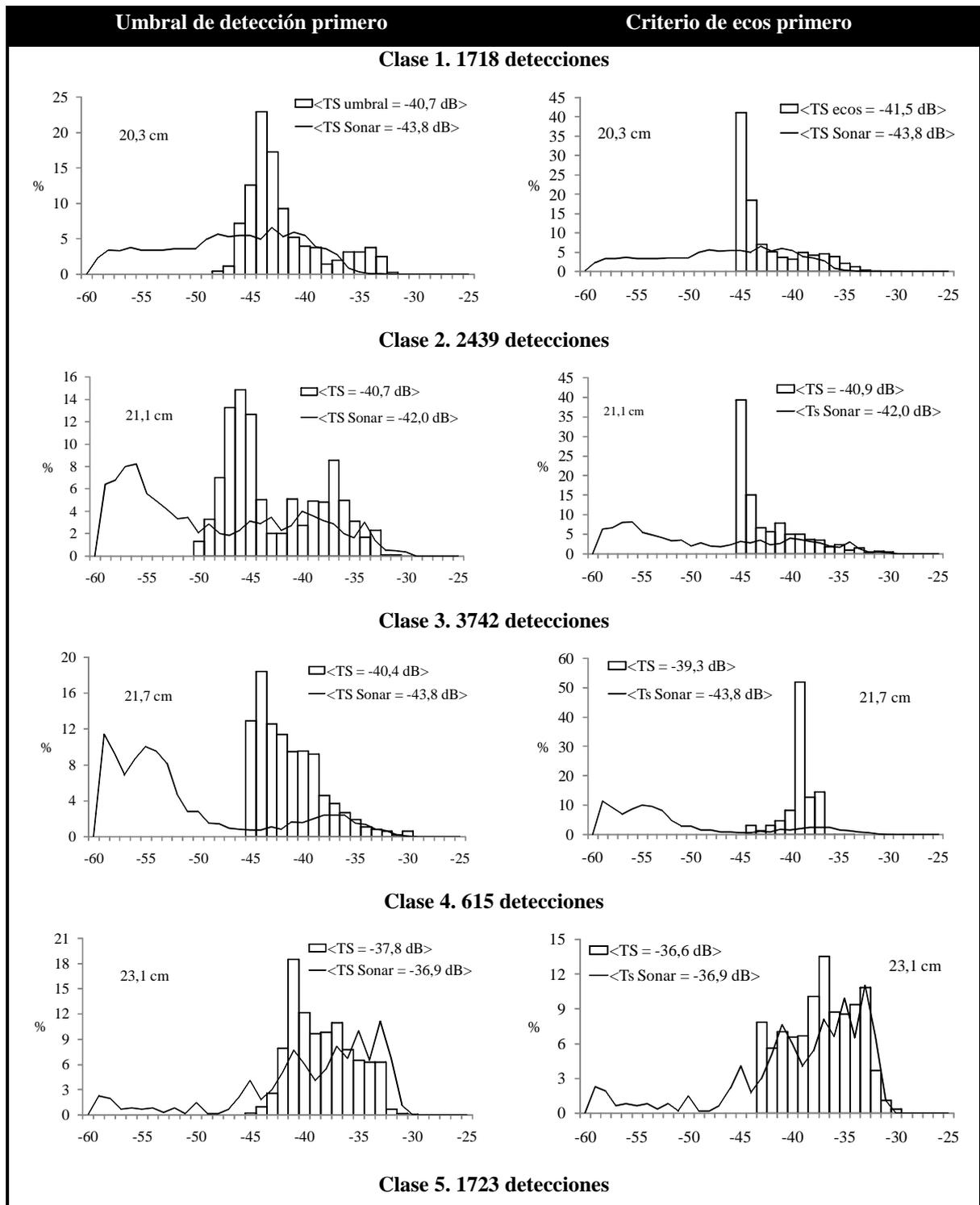
#### *IV.3.1. Distribuciones de TS*

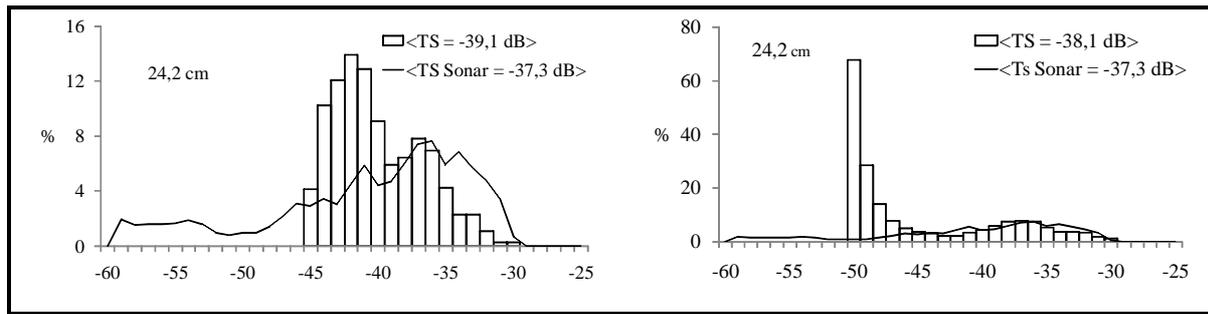
Las comparaciones efectuadas entre los distintos análisis realizados en el caso de mediciones ventrales se muestran en la Tabla 5. En el lado izquierdo de la tabla se tienen las distribuciones obtenidas aplicando primero el umbral y en el lado derecho las que se obtienen empleando el criterio de longitud de ecos en primer lugar.

Los resultados obtenidos son aceptables únicamente en la clase 4, si se aplica primero el criterio de longitud de ecos. La distribución obtenida sigue una tendencia parecida aunque sólo en el rango de -45 a -30 dB debido a la limitación existente en el rango, provocada por el empleo de un umbral de detección (ver capítulo 3.3).

En todos los casos restantes se tienen grandes diferencias entre las distribuciones obtenidas. Además, las distribuciones no son unimodales y los valores promedios difieren en exceso de los que se obtienen con Sonar Pro, no siendo aceptables los resultados obtenidos. Son varias las razones por las que esto ocurre pero por encima de todo se trata de un problema estadístico relacionado con la naturaleza de las mediciones realizadas. El empleo de las técnicas inversas de estimación de la potencia de blanco se basa en el uso de la ecuación integral de haz simple, Ecuación 16. Para que esta ecuación se cumpla, las variables aleatorias B y TS han de ser independientes. Para ello se necesita disponer un elevado número de detecciones individuales provenientes de un elevado número de ejemplares, con diferentes inclinaciones del pez. El hecho de tener un reducido número de ejemplares y de ecos registrados en la jaula provoca cierta dependencia entre ambas variables, de manera que la Ecuación 16 deja de ser cierta y los resultados obtenidos no son válidos.

Tabla 5. Distribuciones de TS para las 5 clases de doradas en el caso de medidas dorsales. Comparación entre Sonar Pro (análisis split-beam) y las dos versiones de la aplicación de procesado (análisis single-beam).





#### IV.3.2. Relación entre el TS y la longitud del pez

Se incluye la relación obtenida entre la potencia de blanco y el logaritmo de la longitud del pez en la Figura 9. En el caso del análisis single-beam con cualquiera de las dos versiones de la aplicación de procesado, los valores de los ajustes no son fiables debido a que las distribuciones de la potencia de blanco no son correctas y por lo tanto no son representativas de la potencia de blanco de las clases de dorada estudiadas. En el caso del análisis split-beam tampoco se obtiene una buena correlación, esto es debido a que el análisis con Sonar Pro se emplearon las mismas condiciones para el análisis que en el caso single-beam, por lo que este análisis carece de eliminación de ruido o detecciones no deseadas y el umbral escogido es bastante bajo, -60 dB, debido a la necesidad de disponer de un rango de valores tal que permita la obtención de un número suficiente de clases para la potencia de blanco, como se explica en el capítulo 3,3. El uso de este umbral provoca que se tenga un mayor número de detecciones entre -50 y -60 dB que entre -50 y -30 dB en las clases de menor tamaño, clases 1, 2 y 3.

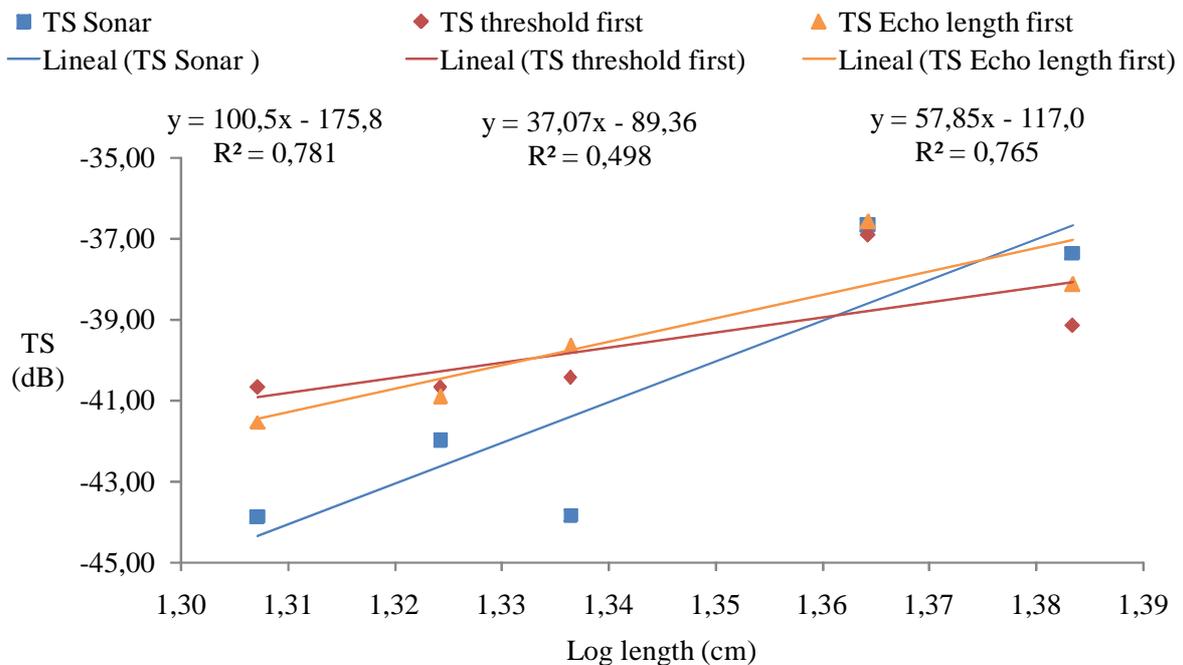


Figura 9. Relación entre el TS y la longitud del pez para mediciones ventrales

## V. CONCLUSIONES

### *V.1. Conclusiones*

Se ha desarrollado una aplicación de lectura y procesado de los ecos registrados por una ecosonda split-beam, tratando los datos registrados como si provinieran de una ecosonda single-beam. La aplicación de procesado permite estimar la potencia de blanco de peces, tanto sin compensar como compensada. Además, se han empleado dos versiones diferentes de la aplicación cambiando el orden de aplicación de dos de los filtros del detector de ecos individuales con el objetivo de observar las diferencias existentes entre ambas, así como las ventajas e inconvenientes de emplear una u otra versión. Se han realizado diferentes comparaciones entre un software de procesado fiable y reconocido, como Sonar Pro 5, que permiten verificar el correcto funcionamiento de las distintas partes de la aplicación de procesado desarrollada.

En primer lugar, se ha comprobado el correcto funcionamiento de la mayor parte de la aplicación, incluyendo la lectura de los ficheros, la aplicación de la función TVG y el detector de ecos individuales, a través de las comparaciones realizadas entre Sonar Pro 5 y la versión de la aplicación que emplea los mismos criterios de análisis. Además, si se emplea la versión de la aplicación en la que se aplica el umbral en primer lugar, como se sugiere en [8], se obtiene una buena correlación a la hora de establecer una relación entre la potencia de blanco sin compensar y el logaritmo de la longitud del pez en mediciones ventrales. Este hecho refuerza la idea de considerar la potencia de blanco sin compensar como parámetro adecuado a la hora de monitorizar el crecimiento de peces en el interior de una jaula marina. Sin embargo, se ha comprobado que los valores obtenidos mediante el ajuste son sensibles a los parámetros de procesado, siendo necesario extender el análisis a futuros estudios con un número más elevado de detecciones antes de afirmar rotundamente que éste parámetro sea apropiado.

En segundo lugar, se ha comprobado la dificultad existente a la hora de establecer una relación entre la potencia de blanco y el logaritmo de la longitud del pez cuando se trata de mediciones dorsales en jaula marina, algo esperable y en sintonía con otros estudios recientes realizados en condiciones similares [13].

Por último, los resultados obtenidos a la hora de estimar la potencia de blanco compensando la ausencia de información angular con la aplicación de la técnica inversa AEMS no pueden ser considerados como válidos. Esto se debe a un problema estadístico de dependencia entre las variables aleatorias implicadas en el cálculo de la potencia de blanco. Si no se dispone de un elevado número de detecciones individuales provenientes de un elevado número de ejemplares, con diferentes inclinaciones del pez, como ha ocurrido en este estudio, no puede considerarse que la potencia de blanco y el patrón de radiación del transductor sean independientes entre sí (Ecuación 16). Esto provoca que la ecuación integral de haz simple, que permite compensar el efecto del patrón de radiación del transductor, deje de cumplirse, ya que la distribución de peces dentro del

volumen de muestreo no puede ser considerada como uniforme, siendo ésta una condición de naturaleza estadística indispensable para que la ecuación integral de haz simple se cumpla. De esta forma, las estimaciones de TS empleando este método no serán representativas de la potencia de blanco de los ejemplares analizados.

En conclusión, los resultados obtenidos permiten verificar el correcto funcionamiento de la aplicación de procesamiento desarrollada a la hora de estimar la potencia de blanco peces sin compensar e incluso llega a establecerse una relación entre ésta y la longitud de las doradas estudiadas. Sin embargo, los resultados de los experimentos realizados han de ser considerados como preliminares, con el objetivo de desarrollar el algoritmo y los criterios de análisis presentados en este estudio, careciendo de una duración y número de detecciones óptimas en las medidas analizadas. Futuros estudios extenderán el análisis a un número mayor de mediciones y clases.

### *V.2. Líneas futuras*

Son varias las futuras líneas de trabajo relacionadas con la aplicación presentada en este estudio. En primer lugar, como se ha comentado en el apartado anterior, resulta necesario realizar una campaña de medidas con una duración y un número de detecciones mucho más elevada que permita la obtención de funciones de distribución de la potencia de blanco unimodales, asegurando una estimación totalmente fiable de la potencia de blanco. Así, se podrá comprobar cuál de las dos versiones de la aplicación resulta más apropiada para el objetivo marcado, que no es otro que la monitorización del crecimiento de los peces en el interior de una jaula marina. Por otro lado, resulta necesario profundizar en las condiciones de aplicación del algoritmo AEMS, tratando de encontrar la forma de obtener la potencia de blanco con compensación de ángulo.

Por otro lado, se desea completar el sistema single-beam implementado por Ester Soliveres en su trabajo final de máster [27] para el Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC). Este sistema se viene desarrollando con el objetivo de instalarse de forma permanente en el interior de jaulas marinas para monitorizar el crecimiento de los peces en el interior de la jaula. Para ello, han de realizarse algunas modificaciones en el código programado que permitan leer los ficheros generados por la ecosonda. Además, una vez que la aplicación se integre en el sistema single-beam será necesaria la creación de un entorno gráfico que permita la modificación de los valores de los parámetros de análisis, la elección de diferentes transductores para la medición o la representación del ecograma mostrando la potencia de blanco, entre otras.

**AGRADECIMIENTOS**

Agradezco especialmente a Dr. Marek Moszynski por facilitarme el código de las funciones relacionadas con el método AEMS implementadas en la aplicación de procesado, y su inestimable ayuda explicándome los fundamentos estadísticos del método. También quisiera agradecer la colaboración de Dr. Helge Balk por su asesoramiento y valiosas sugerencias relacionadas con el funcionamiento del programa Sonar Pro. Por último, deseo extender mi agradecimiento a tod@s los que habéis compartido conmigo este año de trabajo, de una u otra forma. Ha sido un placer para mí.

## REFERENCIAS

- [1] APROMAR, “La acuicultura marina de peces en España, 2009”, [www.apromar.es](http://www.apromar.es)
- [2] A. Bjordal, J. E. Juell, T. Lindem, A. Fernö,. “Hydroacoustic monitoring and feeding control in cage rearing of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)”. I Fish Farming Technology. Balkema, Netherlands, 203-208. (1993).
- [3] X. Xu, X. Zhang, “A remote acoustic monitoring system for offshore aquaculture fish cage”. Oceans’02 MYS/IEEE, 4: 2488-2496. (2002)
- [4] J. K. Horne, P.D. Walline, J. M. Jech, “Comparing acoustic model predictions to in situ backscatter measurements of fish with dual-chambered swimbladders”. Journal of fish Biology. 57: 1105-1121. (2000)
- [5] S. McClatchie, J. Alsop, R. F. Coombs, “A re-evaluation of relationships between fish size, acoustic frequency, and target strength”. ICES Journal of Marine Science. 53: 780–791. (1996)
- [6] D: N. MacLennan, E. J. Simmonds, “Fisheries Acoustics”. Chapman & Hall. (1992).
- [7] K. G. Foote, “Rather-high-frequency sound scattering by swimbladdered fish”. Journal. Acoustical. Society of. America, 78: 688–700. (1985)
- [8] E. Ona. “Methodology for Target Strength Measurements”. ICES Cooperative Research Report n° 235. (1999)
- [9] V. Espinosa, E. Soliveres, V. D. Estruch, M. Bou, G. Larosa, S. Martinez, M. Jover, “Gilt-head sea bream (*Sparus Aurata*) cross –section measurements for the acoustical control of sea farms”. Acústica . Portugal. (2008)
- [10] E. Soliveres, V. Espinosa, J. Redondo, E. Escuder, J. Alba, M. Ardid, V. D. Estruch, S. Martinez, A. Tomás, M. Jover, “Acoustical study of the gilt-head sea bream in reverberating tank”. 2º International Conference & Exhibition on “Underwater Acoustics Measurements: Technologies & Results”. (2007)
- [11] H. Balk, T. Lindem, “Sonar 4 and Sonar 5-Pro Post-processing systems”. Operator manual version 5.9.9. (2008).
- [12] H. Balk, T. Lindem, J. Kubecka, “Enhanced crossfilter detector for target detection in data from echosounders” .29th Scandinavian Symposium On Physical Acoustics. (2006)
- [13] F.R. Knudsen, J. E. Fosseidengen, F. Oppedal, Ø. Karlsen, E. Ona. “Hydroacoustic monitoring of fish in sea cages: target strength (TS) measurements on Atlantic salmon (*Salmo salar*)”. Fisheries Research, 69: 205-209. (2004)
- [14] J. Ehrenberg, “New methods for indirectly measuring the mean acoustic backscattering cross section of fish”. ICES/FAO Symposium on Fisheries Acoustics, Bergen.
- [15] E. Soliveres, J.L. Moreno, A. Cebrecos, V. Espinosa, “Dorsal and ventral measurements on gilt-head sea-bream (*Sparus aurata*)” EcuA 2010, European Conference on Underwater Acoustics, Istanbul. (2010)
- [16] M. L. Petersen, C. S. Clay, S. B. Brandt, “Acoustic estimates of fish density and scattering function”. Journal Acoustical Society of América, 60, 618-622, (1976).
- [17] R. E. Craig, S. T. Forbes, “Design of a sonar for fish counting”. FiskDir. Ser. Haveunders, 15, 210-219. (1969).

- [18] C. S. Clay, "Deconvolution of the fish scattering PDF from the echo PDF for a single transducer sonar". *Journal Acoustical Society of America*, 73 (6), 1989-1994. (1983).
- [19] M. Moszynski, "Indirect Methods of Fish Target Strength Estimation in Absolute and Logarithmic Domain". *Acta Acustica United with Acoustica*. 88, 726-729. (2002).
- [20] L. G. Rudstam, S. Hansson, T. Lindem, D. W. Einhouse, "Comparison of target-strength distributions and fish densities obtained with split- and single-beam echosounders." *Fisheries Research*, 42: 207-214. (1999).
- [21] M. Moszynski, "Adaptive Expectation Maximization Smoothing (AEMS) inverse technique for indirect fish target strength estimation". *Proceedings of ICES Symposium on Fisheries and Aquatic Ecology*. Montpellier. (2002).
- [22] J. B. Hedgepeth, V. F. Gallucci, F. O'Sullivan, R. E. Thorne, "An expectation maximization and smoothing approach for indirect acoustic estimation of fish size and density". *ICES Journal of Marine Science*, 56: 36-50. (1999)
- [23] M. Moszynski, "Statistical analysis for digital processing of pelagic fish echoes". *Politechnikal Gdanska Monografie* 66. (2005)
- [24] M. Moszynski, "Main lobe approximation for the target strength inverse problem". *Proc. Of 4<sup>th</sup> European Conference on Underwater acoustics*, Rome. (1998).
- [25] K. G. Foote, "Acoustic sampling volume". *Journal Acoustical Society of America*, 90, 959-964. (1991).
- [26] D.N. MacLennan, E.J. Simmonds, "Fisheries acoustics", Ed. Chapman & Hall (1992).
- [27] E. Soliveres, "Implementación de una ecosonda científica de haz simple". *Trabajo Final de Master en Ingeniería Acústica*. Universidad Politécnica de Valencia. (2009).
- [28] M. Moszynski, "Fish target strength estimation using multiple echo statistics", *Acoustical Physics* Volume 48, Number 2, 201-208 DOI:10.1134/1.1460957.
- [29] L. Frenkel, M. Feder, "Recursive expectation-maximization (EM) algorithms for time-varying parameters with applications to multiple target tracking", *Orckit Commun.*, Tel-Aviv

## ANEXOS

## Anexo 1. Código Matlab de todas las funciones que forman la aplicación de procesado

```

% PROGRAMA DE LECTURA Y PROCESADO DE ECOS REGISTRADOS EN FICHEROS DE TIPO
% .RAW, PROCEDENTES DE UNA ECOSONDA SPLIT BEAM EK60 PERO TRATADOS COMO SI
% PROVINIERAN DE UNA SINGLE BEAM, DESCARTANDO LA INFORMACIÓN ANGULAR

clearall
closeall

%----- Selección del fichero raw a leer -----

[filename, pathname]=uigetfile('*.*raw', 'Select raw data file',
'C:\Documents and Settings\alcebrui\Escritorio\Tesina\Mediciones\Medidas
Doradas sin convertir');
fname=[pathname filename];
filename=strrep(filename, '.*', '.raw');

%Elección de la profundidad que desea grabarse
%prof=input('Profundidad a grabar (m) = ');

%----- Parámetros inicio -----
-

headerlength=12;    % Bytes en el datagrama de la cabecera
pingno=0;           % N° de ping
totalpings=cuantspings(fname); %cálculo del número de pings del fichero

prof=3;             % Profundidad que desea grabarse [m]

%----- Definición de parámetros de análisis de ecos simples-----

um_NOISE=-100;
um_AMP=-50;        % Umbral del ecograma de amplitud [dB]
um_SED=-50;        % Umbral del ecograma de ecos simples [dB]
echospace=1;       % Espaciado entre ecos
% [En función de la longitud del pulso transmitido]
capa_inferior=1;   % Límite superior para el análisis [m]
capa_superior=2;   % Límite inferior para el análisis [m]
ping_ini=1;        % Ping inicial
ping_fin=totalpings;%Ping final

%----- Lectura del fichero -----

fid=fopen(fname, 'r');
if (fid==-1)
error('Could not open file');
else

%----- Lectura del datagrama de configuración -----

filelength = fread(fid,1,'int32');
dgheader = readdgheader(fid);      % Lectura de fecha y hora
configheader = readconfigheader(fid);% Lectura de la información de
% cabecera de la medición realizada

```

```

for i=1:configheader.transducercount, %Lectura de la configuración
%del transductor
configtransducer(i) = readconfigtransducer(fid);
end

config = struct('header',configheader,'transducer',configtransducer);
clearconfigheader, clear configtransducer
filelength = fread(fid,1,'int32');

% -----Lectura del datagrama NMEA, Annotation, or Sample -----

while (1)
filelength = fread(fid,1,'int32');
if (feof(fid))
break
end
dgheader = readdgheader(fid);% Lectura de fecha y hora,
% ahí se indica el tipo de datagrama)
switch (dgheader.datagramtype)
case'NME0'% NMEA datagram
text = readtextdata(fid,filelength-headerlength);
%disp('NME0');

case'TAG0'% Annotation datagram
text = readtextdata(fid,filelength-headerlength);

case'RAW0'% Sample datagram
pingno = pingno +1;
if pingno==1

sampledata=readsampladata_V2(fid); %la mayoría de los
% datos se repiten ping a ping, por lo que se leen
% una sola vez
nprof=floor(prof/(sampledata.soundvelocity*sampledata.sampleinterval/2));
% N° de muestras para la profundidad seleccionada

sampledata.power=zeros(nprof,totalpings);
        sp_amp=zeros(nprof,totalpings);
        sp_sed=-160*ones(nprof,totalpings);
fs=1/sampledata.sampleinterval;%frecuencia de muestreo
min_E_length=0.8*fs*sampledata.pulselength;
% Longitud mínima del eco, relativo al ancho del pulso
% transmitido [N° de muestras]

        max_E_length=1.8*fs*sampledata.pulselength;
%Longitud máxima del eco, relativo al ancho del pulso
%transmitido [N° de muestras]

echoespacing=echospace*fs*sampledata.pulselength;
% Espaciado mínimo entre ecos, relativo al ancho del pulso
% transmitido [N° de muestras]

        eco_info=zeros(10000,6);eco_info(1,:)=1;
dR= sampledata.soundvelocity.*sampledata.sampleinterval/2;
% Intervalo entre muestras [m]

else
fseek(fid,68,'cof'); % omite la información relevante
% leida en el ping 1

```

```

        sampledata.count=fread(fid,1,'int32');
    end
    power=fread(fid,sampledata.count,'int16');
    if nprof<sampledata.count
        sampledata.power(1:nprof,pingno)=power(1:nprof)*10*log10(2)/256;
    else
        sampledata.power(:,pingno)=power*10*log10(2)/256;
    end
    clearpower

    if (sampledata.mode>1) %Se omite la información de fase
        fseek(fid,2*sampledata.count,'cof');
    end
    sampledata.power(sampledata.power(:,pingno)<um_NOISE,pingno)=-160;
    % Umbral inicial para evitar amplificar el ruido

    % -----Detección de ecos individuales-----

    [sprange,sp_amp(:,pingno)]=applytvgpingno(config,sampledata,pingno);
    % 1.Aplicación del TVG [TSu]

    sp_amp(sp_amp(:,pingno)<um_AMP,pingno)=-160;
    % 2.Umbral del ecograma de AMPLITUD [AMP]

    sp_sed(:,pingno)=sp_amp(:,pingno);
        sp_sed(sp_sed(:,pingno)<um_SED,pingno)=-160;
    % 3.Umbral del ecograma de ecos simples [SED]

    [sp_sed(:,pingno),eco_info_aux]=echolength(sp_sed,max_E_length,min_E_length,pingno,capa_inferior,capa_superior,dR,echospacing);
    % 4.Criterio de la longitud del eco recibido

    ind1=find(eco_info(:,1),1,'last')+1; %almacena la posición inicial de
    % relleno de la matriz de info de ecos

    ind2=find(eco_info(:,1),1,'last')+size(eco_info_aux,1);%almacena
    % la posición final de relleno de la matriz de info de ecos
    if isempty(eco_info_aux)==0
        eco_info(ind1:ind2,:)=eco_info_aux;
    end

    str = sprintf('Read ping no. %i',pingno);
    disp(str);

    otherwise% Determina la opción que se realiza por defecto en un switch
    error(strcat('Unknown datagram ','dgheader.datagramtype, '' in file'));
    end
    filelength = fread(fid,1,'int32');

    end% FIN DE BUCLE DE LECTURA ITERATIVA DE LOS DATOS

    fclose(fid);
    cleartextfseeco_info_auxind1ind2
    sampledata=rmfield(sampledata,'power');
        eco_info=eco_info(2:find(eco_info(:,1),1,'last'),:);

    %----- Análisis de datos.-----

```

```

gamma=-0.001; % Coeficiente exponencial. Permite ajustar la pendiente de
la curva aproximada a la curva medida.
theta_3dB=3.5;% Angulo en el que la directividad del transductor se
reduce 3 dB.
theta_max=10; % Angulo máximo considerado en el análisis
capa_inf=ceil(cap_a_inferior/dR)+1;
capa_sup=ceil(cap_a_superior/dR);
Datos_analisis =
struct('cap_a_inferior',cap_a_inferior,'cap_a_superior',cap_a_superior,...
'ping_inicio',ping_ini,'ping_final',ping_fin,'Max_echo_length',
max_E_length,'Min_echo_length',min_E_length,'Umbral_Amp',um_AMP,
'Umbral_Sed',um_SED,'Echospacing',echospacing,'dR',dR,'Total_pings',pin
gno,'Sprange',sprange,'Sp_Amp',sp_amp,'Sp_Sed',sp_sed,'gamma',gamma,'thet
a_3dB',theta_3dB,'theta_max',theta_max);

clear echospace echospacing cap_a_inferior cap_a_superior ping_ini ping_fin dR sp_
amp um_AMP um_SED max_E_length min_E_length pingno sprangesp_sed gamma theta_3dB t
heta_max

[pE,xE,pTS_ems,pTS_ems1,pTS_ems2,xTS,pB,pB_ems1,pB_ems2,xB,detecciones]=.
.analisis (Datos_analisis);

Resultados = struct('pE',pE, 'pTS', pTS_ems, 'pB', pB,'xE',xE,'xTS'...
,xTS,'xB', xB,'Echo_info',eco_info,'Detecciones',detecciones);

clear eco_inf detecciones

%-----Escritura de los resultados en un fichero-----

clear
um_NOISEfnamfnamesampled_data.powerfilelengthprofstrpathnameppowernprofmode
_lowmode_higheco_inieco_fin_fidiheaderlengthtotalpings

save(['D:\Usuarios\Jandri\Tesina\Mediciones\Conversiones Matlab\Rango 1-
2m\Umbral 50 dB\Clase 5\Ventrales\' filename '.mat']);
disp('Finished reading file');

end

%-----Código de todas las funciones empleadas-----

function pingmax=cuanto_spings(fname)

%PROGRAMA QUE CALCULA EL NUMERO DE PINGS DE UN FICHERO .RAW

% La forma de obtener la duración consiste en recorrer el fichero al
% completo, tal y como realiza el programa principal. La diferencia
% consiste en que aquí se omiten todos los datos, almacenando únicamente
el número de pings del archivo

headerlength=12;
pingno=0;
fid=fopen(fname,'r');
if (fid==-1)
error('Could not open file');
else
fseek(fid,4,'cof');
fseek(fid,12,'cof');
fseek(fid,512,'cof');

```

```

transducercount = fread(fid,1,'int32');
fseek(fid,320*transducercount,'cof');
fseek(fid,4,'cof');
while (1)
filelength = fread(fid,1,'int32');
if (feof(fid))
break
end
datagramtype=char(fread(fid,4,'char'));
fseek(fid,8,'cof');
switch (datagramtype)
case'NME0'
fseek(fid,filelength-headerlength,'cof');
case'TAG0'
fseek(fid,filelength-headerlength,'cof');
case'RAW0'
pingno = pingno +1;
if pingno==1
fseek(fid,2,'cof');
mode_low = fread(fid,1,'int8');
mode_high = fread(fid,1,'int8');
sampledata.mode = 256*mode_high + mode_low;
fseek(fid,64,'cof');
else
fseek(fid,68,'cof');
end
sampledata.count=fread(fid,1,'int32');
fseek(fid,sampledata.count*2,'cof');
if (sampledata.mode>1)
fseek(fid,2*sampledata.count,'cof');
end

otherwise
error(strcat('Unknown datagram ','',datagramtype,''' in file'));
end
filelength = fread(fid,1,'int32');

end
fclose(fid);
clearfid, clear length, clear headerlength, clear i,
end
pingmax=pingno;

function dgheader = readdgheader(fid);

% Reading EK60 raw data file datagram header
% Simrad, Lars Nonboe Andersen, 8/5-03

dgheader.datagramtype = char(fread(fid,4,'char'));

lowdatetime = fread(fid,1,'uint32');
highdatetime = fread(fid,1,'uint32');

dgheader.datetime = NTTime2Mlab(highdatetime*2^32 + lowdatetime);

function configheader = readconfigheader(fid);

% Reading EK60 raw data file configuration header
% Simrad, Lars Nonboe Andersen, 21/12-01

```

```

configheader.surveyname = char(fread(fid,128,'char'));
configheader.transectname = char(fread(fid,128,'char'));
configheader.soundername = char(fread(fid,128,'char'));
configheader.spare = char(fread(fid,128,'char'));
configheader.transducercount = fread(fid,1,'int32');

```

```
function configtransducer = readconfigtransducer(fid);
```

```

% Reading EK60 raw data file configuration transducer
% Simrad, Lars Nonboe Andersen, 8/5-03

```

```

configtransducer.channelid = char(fread(fid,128,'char'));
configtransducer.beamtype = fread(fid,1,'int32');
configtransducer.frequency = fread(fid,1,'float32');
configtransducer.gain = fread(fid,1,'float32');
configtransducer.equivalentbeamangle = fread(fid,1,'float32');
configtransducer.beamwidthalongship = fread(fid,1,'float32');
configtransducer.beamwidthathwartship = fread(fid,1,'float32');
configtransducer.anglesensitivityalongship = fread(fid,1,'float32');
configtransducer.anglesensitivityathwartship = fread(fid,1,'float32');
configtransducer.angleoffsetalongship = fread(fid,1,'float32');
configtransducer.angleoffsetathwartship = fread(fid,1,'float32');
configtransducer.posx = fread(fid,1,'float32');
configtransducer.posy = fread(fid,1,'float32');
configtransducer.posz = fread(fid,1,'float32');
configtransducer.dirx = fread(fid,1,'float32');
configtransducer.diry = fread(fid,1,'float32');
configtransducer.dirz = fread(fid,1,'float32');
configtransducer.pulselengthtable = fread(fid,5,'float32');
configtransducer.spare2 = char(fread(fid,8,'char'));
configtransducer.gaintable = fread(fid,5,'float32');
configtransducer.spare3 = char(fread(fid,8,'char'));
configtransducer.sacorrectiontable = fread(fid,5,'float32');
configtransducer.spare4 = char(fread(fid,52,'char'));

```

```
function textdata = readtextdata(fid,length)
```

```

% Reading EK60 raw data file text data
% Simrad, Lars Nonboe Andersen, 21/12-01
% length in bytes

```

```
textdata.text = char(fread(fid,length,'char'));
```

```
function sampledata = readsampledata_V2(fid)
```

```

% Reading EK60 raw data file sample data
% Simrad, Lars Nonboe Andersen, 12/04-02

```

```

sampledata.channel = fread(fid,1,'int16'); %2
mode_low = fread(fid,1,'int8'); %3
mode_high = fread(fid,1,'int8'); %4
sampledata.mode = 256*mode_high + mode_low;
sampledata.transducerdepth = fread(fid,1,'float32'); %8
sampledata.frequency = fread(fid,1,'float32'); %12
sampledata.transmitpower = fread(fid,1,'float32'); %16
sampledata.pulselength = fread(fid,1,'float32'); %20
sampledata.bandwidth = fread(fid,1,'float32'); %24

```

```

sampledata.sampleinterval = fread(fid,1,'float32');           %28
sampledata.soundvelocity = fread(fid,1,'float32');           %32
sampledata.absorptioncoefficient = fread(fid,1,'float32');   %36
sampledata.heave = fread(fid,1,'float32');                  %40
sampledata.roll = fread(fid,1,'float32');                   %44
sampledata.pitch = fread(fid,1,'float32');                  %48
sampledata.temperature = fread(fid,1,'float32');           %52
sampledata.trawlupperdepthvalid = fread(fid,1,'int16');     %54
sampledata.trawlopeningvalid = fread(fid,1,'int16');        %56
sampledata.trawlupperdepth = fread(fid,1,'float32');        %60
sampledata.trawlopening = fread(fid,1,'float32');           %64
sampledata.offset = fread(fid,1,'int32');                   %68
sampledata.count = fread(fid,1,'int32');                    %72

function[sprange,sp,svrange,sv]=applytvgpspingno(config,insampled,pingno
)

% Applies TVG to one ping of raw sample power data

channel = insampled.channel;

configtransducer = config.transducer(channel);
pulselengthtable = configtransducer.pulselengthtable;
gaintable = configtransducer.gaintable;
sacorrecciontable = configtransducer.sacorrecciontable;
psi = configtransducer.equivalentbeamangle;

soundvelocity = insampled.soundvelocity;
absorptioncoefficient = insampled.absorptioncoefficient;
sampleinterval = insampled.sampleinterval;
transmitpower = insampled.transmitpower;
frequency = insampled.frequency;
pulselength = insampled.pulselength;
count = insampled.count;
power = insampled.power;

if (count>0)

pulselengthindex = find(pulselengthtable==pulselength);
if ~isempty(pulselengthindex)
gain = gaintable(pulselengthindex);
sacorreccion = sacorrecciontable(pulselengthindex);
else
gain = configtransducer.gain;
sacorreccion = 0;
end

samplespace = soundvelocity.*sampleinterval/2;

lambda = soundvelocity/frequency;

% Sv values
svcenterrange = soundvelocity.*pulselength/4;
svrange = (0:count-1).*samplespace - svcenterrange;
svtvrange = svrange;
svtvrange(find(svtvrange<samplespace)) = samplespace;

```

```

    tvg20 = 20*log10(svtvgrange) + 2*absorptioncoefficient*svtvgrange;
    idxtvg20less0 = find(tvg20<0);
    tvg20(idxtvg20less0) = 0;

svconst =
10*log10(transmitpower*lambda^2*soundvelocity*pulselength/(32*pi^2)) +
2*(gain+sacorreccion) + psi;

sv = power(:,pingno) + tvg20 - svconst;

% Sp values
sprange = (0:count-1)*samplespace;
sptvgrange = sprange;
sptvgrange(find(sptvgrange<samplespace)) = samplespace;

    tvg40 = 40*log10(sptvgrange) + 2*absorptioncoefficient*sptvgrange;
    idxtvg40less0 = find(tvg40<0);
    tvg40(idxtvg40less0) = 0;

spconst = 10*log10(transmitpower*lambda^2/(16*pi^2)) + 2*gain;
sp = power(:,pingno) + tvg40 - spconst;

%outsampleddata.svrange = svrange;
%outsampleddata.sv = sv;
%outsampleddata.sprange = sprange;
%outsampleddata.sp = sp;
else
outsampleddata = [];
end

function[v_sp_sed,eco_info_aux]=echolength(sp_sed, max_E_length,
min_E_length, p, capa_inferior, capa_superior, dR, echospacing)

% Algoritmo de detección de ecos en función de la longitud relativa
respecto del pulso transmitido
%
% Parámetros de entrada

% -Sp_sed:      Matriz de ecos simples
% -Max_E_length: Longitud máxima del eco [Nº de muestras]
% -Min_E_length: Longitud mínima del eco [Nº de muestras]
% -p:          Nº ping
% -capa_inferior:Rango inferior empleado durante el análisis [m]
% -capa superior:Rango superior empleado durante el análisis [m]
% -dR:         Intervalo entre muestras [m]
% -echospacing: Mínima separación entre ecos [Nº de muestras]

% Parámetros de salida

% -V_sp_sed:   Vector de ecos simples tras aplicación del criterio de
%             longitud de eco. Aunque el criterio calcula las muestras
%             de inicio y final de eco de cada uno de estos, el vector
%             solo incluye la muestra de máximo valor de cada eco,
usada
%             tanto para la visualización del ecograma como para el
calculo
%             del valor del TSu de cada eco individual
%

```

```

%Nota: Otro criterio valido para el calculo del TSu de cadaeco individual
consisten el promediado de todas lasmuestras de cada eco
%
% -Eco_info:      Matriz con toda la información necesaria para
caracterizarcada uno de los ecos individuales aceptados por el criterio
de longituddel eco. Cada columna incluye la siguiente información

%--1--      --2--      --3--      --4--      --5--      --6--
% Ping      Muestra inicial      Pico      Muestra final      Longitud      TSu
%
% -e: Contador de ecos válidos para el análisis, se emplea para
%          rellenar la matriz de información de ecos

% Otros parámetros utilizados

% -Eco_ini:      Vector en el que se incluyen los índices de las muestras
de
%               inicio de cada uno de los ecos de un mismo ping.
% -Eco_fin:      Vector en el que se incluyen los índices de las muestras
de
%               fin de cada uno de los ecos de un mismo ping

%-----Definición de variables-----

    eco_ini=zeros(floor(size(sp_sed,1)/4),1);
%almacena el número de muestra de inicio del eco
    eco_fin=zeros(floor(size(sp_sed,1)/4),1);
%almacena el número de muestra de fin de eco
v_sp_sed=-160*ones(size(sp_sed,1),1);
e=0; %Contador del número de ecos
    e_aux=0;

%-----Detección de picos y valles-----

    peaks=find((sp_sed(2:end-1,p)>sp_sed(1:end-2,p)).*(sp_sed(2:end-
1,p)>=sp_sed(3:end,p)))+1;%Vector con todos los picos de la señal en 1
ping
    valleys_aux=find((sp_sed(2:end-1,p)<sp_sed(1:end-
2,p)).*(sp_sed(2:end-1,p)<=sp_sed(3:end,p)))+1;%Vector con todos los
minimos de la señal en 1 ping
valleys=ones(1,length(peaks))';
valleys(1:length(valleys_aux))=valleys_aux;
    eco_info_aux=zeros(length(peaks),6);

%-----Detección de muestras de inicio y fin de eco-----

for j=1:length(peaks)
% Detección de la muestra de inicio de eco
if (sp_sed(1:peaks(j),p)-sp_sed(peaks(j),p)<-6)==0
        eco_ini(j)=1;
else
        eco_ini(j)=find(sp_sed(1:peaks(j),p)-
sp_sed(peaks(j),p)<-6,1,'last')+1;
%Obtención de los índices de las muestras de inicio de
%los ecos individuales. La muestra de inicio es aquella
% cuyo valor de amplitud es 6 dB inferior al pico
end

% Detección de la muestra de fin de eco
if (sp_sed(peaks(j):end,p)-sp_sed(peaks(j),p)<-6)==0

```

```

        eco_fin(j)=size(sp_sed,1);
else
        eco_fin(j)=peaks(j)+find(sp_sed(peaks(j):end,p)-
sp_sed(peaks(j),p)<-6,1,'first')-2;
%Obtención de los índices de las muestras de fin de los
%ecos individuales. La muestra de inicio es aquella
% cuyo valor de amplitud es 6 dB inferior al pico
end

%----- Supresión de ecos múltiples -----

mult_peak=find((peaks>=eco_ini(j)).*(peaks<=eco_fin(j)));
%guarda los índices de los picos presentes en un eco
mult_peak=mult_peak(1:find(mult_peak,1,'last'));
%dimensiona el vector para que no haya 0`s
        multiple_peak_ind=0;
%indicador de presencia de picos múltiples en un eco

for i=1:length(mult_peak)-1
if sp_sed(valleys(mult_peak(i)),p)>...
        sp_sed(peaks(mult_peak(i)),p)-1.5 ||...
        sp_sed(valleys(mult_peak(i)),p)>...
        sp_sed(peaks(mult_peak(i+1)),p)-1.5
multiple_peak_ind=1;%indicador de picos múltiples
%en un eco, se activa si la diferencia entre el valle
%y cualquiera de los picos es mayor de 1.5 dB
end
end

%----- Aplicación del criterio de la longitud del eco -----

if eco_fin(j)-eco_ini(j)+1>min_E_length ...
&& eco_fin(j)-eco_ini(j)+1<max_E_length && multiple_peak_ind==0

[val_max,ind_max]=max(sp_sed(eco_ini(j):eco_fin(j),p));
        ind_max=ind_max+eco_ini(j)-1; %índice de la muestra de
%máximo valor del eco
        v_sp_sed(ind_max)=sp_sed(ind_max,p); %solo se almacena
la muestra de máximo valor
        e_aux=e_aux+1;
        eco_info_aux(e_aux,:)= [p eco_ini(j) ind_max
eco_fin(j)...
        eco_fin(j)-eco_ini(j)+1 sp_sed(ind_max,p)];
end
end
%eco_info=eco_info(1:find(eco_info(:,1),1,'last'),:);
%redimensionado de la matriz de info eliminando 0's

eco_info_aux=eco_info_aux(1:find(eco_info_aux(:,1),1,'last'),:);
%redimensionado de la matriz de info auxiliar eliminando 0's

% ----- Aplicación espaciado mínimo entre ecos -----

for k=1:(size(eco_info_aux(:,1),1)-1)

if eco_info_aux(k+1,2)-eco_info_aux(k,4)<echoespacing;

        v_sp_sed(eco_info_aux(k,3))=-200;
%elimina el eco i de la matriz de ecos simples

```

```

        v_sp_sed(eco_info_aux(k+1,3))=-200;
%elimina el eco i+1 de la matriz de ecos simples
end
end
% Eliminacion de ecos no válidos de la matriz de info(
%for m=size(eco_info(:,1),1):-1:1
%
%   if eco_info(m,6)==0
%       eco_info(m,:)=0;
%   end

%end
%if isempty(find(eco_info(:,6),1,'last'))
%   eco_info=[];
%else
%   eco_info=eco_info(1:find(eco_info(:,6),1,'last'),:);
%end

%NOTA: LA MATRIZ DE INFO DE ECOS ESTA EN FASE DE PRUEBAS Y CONTIENE
ERRORES A LA HORA DE MOSTRAR LOS ECOS. SIN EMBARGO, SE USA SIN ERROR PARA
LA APLICACIÓN DEL ESPACIADO MINIMO ENTRE ECOS

function[pE,xE,pTS_ems,pTS_ems1,pTS_ems2,xTS,pB,pB_ems1,pB_ems2,xB,detecc
iones]= analisis(Datos_analisis)

% Función que realiza el análisis de ecos simples en un ecograma en forma
% matricial. La función devuelve los histogramas del TSu y TS, la
% aproximación de la PDF del patrón de directividad del transductor y el
% número de detecciones totales dentro de la capa analizada. Además, se
representan las funciones distribución de probabilidad de las 3 variables
aleatorias con las que trabaja el algoritmo AEMS,  $P_{TSu}$ ,  $P_B$  Y  $P_{TS}$ .

% Parámetros de entrada

% -Datos_analisis: Struct con variables y matrices necesarias para el
%
%                   analisis

% -X:
%       Vector con los valores de las clases presentes en los
%       histogramas. Determina el número de clases y la
anchura
%       en dB de cada una de ellas
%
% Parámetros de salida

% -TSu:
%       Distribución de TSu, sin compensación del patrón de
%       directividad del transductor
%
% -TS:
%       Distribución de TS, corregido mediante la aplicación
%       de técnicas inversa (algoritmo EMS)
%
% -PB:
%       Aproximación de la función densidad de probabilidad
del
%       patron de directividad del transductor utilizado
%
% -detecciones:
%       Detecciones totales dentro de la capa analizada
% Otros parámetros utilizados

% -eco_ini:
%       Vector en el que se incluyen los índices de las muestras
de

```

```

% inicio de cada uno de los ecos de un mismo ping.
% -eco_fin: Vector en el que se incluyen los índices de las muestras
de
% fin de cada uno de los ecos de un mismo ping

%-----Datos de entrada necesarios para el análisis-----

gamma=Datos_analisis.gamma;
theta_3dB=Datos_analisis.theta_3dB;
theta_max=Datos_analisis.theta_max;
sp_sed=Datos_analisis.Sp_Sed; %matriz de ecos simples
dR=Datos_analisis.dR; %intervalo entre muestras [m]
capa_inf=ceil(Datos_analisis.capa_inferior/dR)+1;
% limite inferior de la capa de analisis [Nº de muestra]

capa_sup=ceil(Datos_analisis.capa_superior/dR);
%limite superior de la capa de analisis [Nº de muestra]

ping_ini=Datos_analisis.ping_inicio;
ping_fin=Datos_analisis.ping_final;
xE=-61:1:-30;
pE=zeros(1,length(xE));

%-----Obtención de la función densidad de probabilidad del patrón-----
-----de radiación del transductor-----

[~,~,PB,xB_aux]=beampatternpdf(gamma,theta_3dB,theta_max);

%-----Histograma del TSu-----

pE=sum(hist(sp_sed(capa_inf:capa_sup,ping_ini:ping_fin),xE),2);

detecciones=sum(pE);

xB=-15:0; %vector de clases del patrón de radiación del transductor

%-----Aplicación del algoritmo AEMS-----

pB=PB(xB-min(xB)+1);
pE=pE(2:end);xE=xE(2:end);
%redimensionado de los vectores para correcta aplicación de EMS

pE=pE';
xTS=min(xE)-min(xB):max(xE)-max(xB);
detecciones=sum(pE);

K=convmatx(pB,xTS,xE);
pTS_ems=ems(K,pE);

% AEMS -Paso1

K=convmatx(pTS_ems,xB,xE); %Kernel K
pB_ems1=ems(K,pE);
K=convmatx(pB_ems1,xTS,xE);
pTS_ems1=ems(K,pE)';

% AEMS - Paso2

K=convmatx(pTS_ems1,xB,xE);
pB_ems2=ems(K,pE);

```

```

K=convmatx(pB_ems2,xTS,xE);
pTS_ems2=ems(K,pE)';

figure
subplot(221); bar(xE,pE); title('P_E');
subplot(222); bar(xB,pB); title('P_B');
subplot(223); plot(xE,pE/max(pE),xTS,pTS_ems/max(pTS_ems));
title('P_E, P_{TS_{ems}}')
subplot(224); plot(xE,pE,xE,conv(pTS_ems,pB)); title('P_E, P_{TS_{ems}}*
P_B');
% verification
shg
print-dmetaal_fig

figure
subplot(221); bar(xE,pE); title('P_E');
subplot(222); bar(xB,pB); title('P_B'); hold on;
plot(xB,pB,xB,pB_ems1,xB,pB_ems2); hold off
subplot(223); plot(xE,pE/max(pE),xTS,pTS_ems/max(pTS_ems),xTS,...
    pTS_ems1/max(pTS_ems1),xTS,pTS_ems2/max(pTS_ems2)); title('P_E,
P_{TS_{ems}}')
subplot(224);
plot(xE,pE,xE,conv(pTS_ems,pB),xE,conv(pTS_ems1,pB_ems1),...
xE,conv(pTS_ems2,pB_ems2)); title('P_E, P_{TS_{ems}}* P_B'); %
verification
shg
print-dmetaal2_fig

xB=xB'; xE=xE'; xTS=xTS'; pB_ems1=pB_ems1'; pB_ems2=pB_ems2';
pTS_ems=pTS_ems'; pE=pE';

function[b_medido,b_aprox,PB,xB]=beampatternpdf(gamma,theta_3dB,theta_max
)

%Función que permite obtener el diagrama de directividad y la
%función densidad de probabilidad del transductor.

xB=(-30:1:0)';
theta=(0:theta_max/(length(xB)-2):theta_max)';
theta_medido=[0 3.5 5 6.3 7.3 7.8 8.5 9 9.2]';
b_medido=[0 -3 -5 -10 -15 -20 -25 -28 -30]';
p=polyfit(theta_medido,b_medido,3);
b_medido=polyval(p,theta);
% ajusta las dimensiones de b_medido--->PB para aplicar correctamente la
funcion EMS
clearp
b_aprox=(1-(1-2^-gamma).*((1-cos(theta.*pi()/180))./...
    (1-
cos(theta_3dB.*pi()/180))))).^ (1/gamma);
PB=(log(10)/20)*(gamma/(1-2^-gamma)).*((1-cos(theta_3dB.*pi()/180))./(1-
cos(theta_max.*pi()/180))).*10.^(gamma.*xB/20);

function K=convmatx(f2,f1,f3)

% -Esta función adapta la FDP del patrón de directividad del transductor
a
% la forma matricial necesaria para realizar la convolución

```

```

[a b]=size(f2); %almacena las dimensiones de la PDF del patrón de
directividad del transductor
N=length(f2);if(b==N),f2=f2';end
M=length(f1);if(M==1),M=f1';end
if nargin<3
    LL=M+N-1;
else
    LL=length(f3);if(LL==1),LL=f3';end
end

K=zeros(LL,M);
for i=1:M,
K(i:i+N-1,i)=f2;
end
[a,b]=size(K);
K=K(a-LL+1:a,:);

function [x,X]=ems(A,y,spar,maxiter,crt)

% Solves y=Ax using EMS method (spar-smoothing param)
%     z=Kx
%     MM 96-09-30

if nargin<3, spar=0; end
if nargin<4, maxiter=1000; end
if nargin<5, crt=0.01; end
[my,ny]=size(y);
if my<ny,y=y';end

% find zero columns
idx=any(A); %
K=A(:,find(idx));

[m,n]=size(K);
q=sum(K);
xo=1/sum(y)*ones(size(q));

if spar>0
    s=smoothmx(n,spar);
end

X=xo;
for iter=1:maxiter
    x=(xo./q).*((y'./(xo*K'))*K);
if(spar>0)
    v=x*s;
    x=v*sum(x)/sum(v);
end
if norm(x-xo) < crt*norm(x)
break;
end
xo=x;
% restore zero data
X=[X;x];
end

x=[zeros(size(find(idx==0))) x];

function s=smoothmtx(n,spar)
%
```

```
% Smoothing matrix with Gaussian kernel
% MM 96-10-01
%

if nargin<2,spar=1;end

sspar=spar*spar;

ij=toeplitz(0:n-1).^2;

nn=2*floor(2.76*spar)+1;
v=sum(exp(-ij(1:2*nn+2,n)/(2*sspar)));

s=exp(-ij/(2*sspar))/v;
s=s./(ones(n,1)*sum(s'));
```

## Anexo 2. Comparison of target strength (TS) distributions by means of the use of direct and indirect techniques in sea cages

### Comparison of target strength (TS) distributions obtained by means of the use of direct and indirect techniques in sea cages

Alejandro Cebrecos<sup>1</sup>, Ester Soliveres<sup>1</sup>, Victor Espinosa<sup>1</sup>, Marek Moszynski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC). Universidad Politécnica de Valencia. c/ Parainfo, 1, 46730, Grao de Gandía, Valencia, España. {alcebrui, essogon, vespinos}@upv.es

<sup>2</sup>Acoustics Department. Technical University of Gdansk. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdansk, Poland. marmo@eti.pg.gda.pl

The aim of this study is to verify the reliability of a processing application developed for the indirect measurement of target strength (TS), with a view to the integration into a single-beam system for its utilization in fish farms. Dorsal and ventral measurements are carried out for gilt-head sea-bream (*Sparus Aurata*) for 5 size classes using a split-beam EK60 echosounder and single-beam data obtained from one of the channels from the echosounder. Data measured using single-beam system lacks information about the relative position of the target on the transducer's beam, making it necessary to use inverse techniques to eliminate the dependence of TS with the beam pattern of the transducer. Among the various existing techniques, the adaptive maximization, expectation and smoothing method is one that achieves results similar to those obtained using direct methods, implemented in split-beam systems. Firstly, the comparison is made between uncompensated target strength (TSu) distributions from EK60 echosounder regardless of the phase information, checking the proper functioning of the first part of processing application. Secondly, comparing TS distribution from the analysis made with the single-beam data with that obtained using the split-beam echo-sounder EK60, designed for direct TS estimation, with the purpose of assessing the reliability of a low-cost system for indirect TS estimation in sea cages.

## 1 Introduction

Marine aquaculture is a growing industry and a certain reality in the Mediterranean Sea. In 2008 production reached 57,893 tons of European sea bass (*Dicentrarchus Labrax*) and 84,593 tons of the Gilt-head sea bream (*Sparus Aurata*), produced mainly in Greece, Turkey, Italy and Spain [1]. The estimation of fish growth and biomass are essential in aquaculture in order to prepare the production plan of the fish farms and to organize and carry out several management operations, such as classification and distribution of fish, discharge of new lots, harvesting schedule and also for calculating the daily feeding rates. In spite of sufficient technology to fulfill the production needs, it is necessary to optimize different production factors, not only to improve its economical profitability but also to minimize the possible ecological impacts. Among these factors we must emphasize the feeding strategy, the growing and population monitoring. The daily feeding is estimated in terms of the present biomass [2] and it is a function of different factors such as the average size of the fishes, the season, the water temperature, etc. Therefore, size (mass) and fish number estimation are viewed as crucial needs for the adequate management of the production.

Among the different techniques employed to achieve such proposes in the control of fish farms, acoustic techniques [4], [20] provide the capacity to do so. Nevertheless, the high price of commercial scientific echosounders makes the permanent installation of such devices in sea cages difficult. Considering single-beam

echo sounders as the most affordable system among the existing scientific echo sounders, the use of this type of echo sounder may be a suitable choice for installation on fish farms. In order to confirm this assertion, it is necessary to verify the feasibility of monitoring growth, abundance and feeding of fish in sea cages using this kind of system.

The establishment of correlation between target strength and fish length has been, and is being studied in different pelagic species, mainly in the case of dorsal "in situ" measurements [10]. In [14], a summary of results obtained in the relationship between TS and fish length for several fish species, mainly swimbladdered ones, is presented. The results of dorsal TS measurements made in sea cage, where the distance between transducer and target may be similar to the near field of the fish (about 6 m for the Gilt-head sea bream specimens studied), may cause TS dependence on the range, making it difficult to obtain good correlation between TS and fish length.

Many fish species, including Gilt-head sea bream, Sea bass, Tuna, Salmon and Herring, among others, are swimbladdered fishes. This body is responsible for most of the energy reflected from the fish [13], [8], [7]. Therefore, the performance of ventral measurements in sea cages is highly recommended, since it is likely to obtain a better correlation between TS and fish length than the one obtained for dorsal case. Besides the presence of swimbladder, other factors such as its volume, fish orientation and behaviour, results in target strength distributions with variations that can reach more than 10 dB. Despite these variations, it may be possible to distinguish acoustically several distinct fish size classes

provided that a large number of individual detections are recorded during the measurements[12].

The aim of this work is to verify the proper functioning of an application developed for the conversion and analysis of single-beam data and to continue the initiated work in IGIC [7], [19], in order to achieve a permanent and therefore affordable single-beam system, suitable to withstand long periods of time in fish farms. This paper shows the comparisons made between target strength distributions for dorsal and ventral measurements of the Gilt-head sea bream (*Sparus Aurata*), testing the processing application presented. The relation between both uncompensated and compensated target strength and fish length is also shown.

## 2 Material and Methods

### 2.1 Measurements

Measurements used in this study took place at Gandia's Harbour (Valencia) on July 2009. Five different classes of Gilt-head sea bream, previously classified according to size, known mass and length of each specimen (average length of each class: 20.3, 21.1, 21.7, 23.1, 24.2 cm, between 2 and 8 specimens each class) were used for the measurements. A small size sea cage (maximum diameter 3 m, height 2.7 m) was used, capable of accommodating a low number of specimens simultaneously in the cage, in order to avoid high fish densities. This situation may cause overestimation in the mean target strength value, as shown in [12]. Water temperature during measurements was 27.3 °C

A Simrad EK60 echosounder with a split beam transducer (200kHz) and circular beamwidth of 7° (nearfield around 1 m) was used. The Transducer was located at the top of the cage transmitting downwards for dorsal recordings, and at the bottom, transmitting upwards for ventral recordings. Transmitting power was 90 W, pulse length was 64 µs and the time interval between pings 20 ms. Calibration was performed in the cage before placing fishes in it and starting to measure, using a copper calibration sphere of 13.7 mm in diameter [13]. Measurements were made during one hour approximately for each class. Data were recorded in raw files for further conversion and analysis.

### 2.2 Single Echo Detection Analysis

In order to verify the proper functioning of the developed application, Sonar Pro v.5.9.9 post-processing software was used. This software allows, among others diverse functions, analysis by means of single echo detection (echo counting method) obtaining both uncompensated and compensated target strength distributions for single-beam and split-beam analysis. Analysis parameters used in Sonar Pro and either of the two versions of processing application presented, are shown in Table 1. Values of main parameters involved in single echo detection analysis. Last two parameters are used for split-beam case only.:

Parameter	Value
<b>Min. Target Size</b>	-50, -60 <sup>(1)</sup> dB
<b>Min Echo length</b>	0.8
<b>Max. Echo Length</b>	1.8
<b>Mult. Peak Suppression</b>	1.5 dB
<b>Min. Echoes spacing</b>	4 samples
<b>Max. Gain Compensation<sup>(1)</sup></b>	6 dB
<b>Max Phase deviation<sup>(1)</sup></b>	8° (1 in Sonar)
<b>Analysis layer</b>	1-2 m

Table 1. Values of main parameters involved in single echo detection analysis. Last two parameters are used for split-beam case only.<sup>(1)</sup>Used for split-beam case only.

Data extracted from the analysis is treated to obtain mean TSu and mean TS, and conversion to linear domain is made to complete these calculations.

A single target detection algorithm selects echoes from isolated targets in each transmission in order to obtain target strength distribution afterwards. The different filters included in the detector are described in [12]. Such a detector achieves positive results in ideal situations, where fish density is low enough to distinguish between different specimens.

Two different versions of single echo detector are used. On the one hand, echo length criterion is applied before threshold, used to eliminate unwanted detections, analogous to that used in Sonar Pro software. On the other hand, threshold is applied first and echo length criterion then, as suggested in [12]. The former does not modify the signal obtained after echo integration, but as a result of the subsequent threshold application, echoes with a fewer number of samples than set in echo length criterion may be accepted as valid detections. The latter allows every echo accepted as a single echo to have the correct number of samples, which is consistent with the established echo length criterion. However, application of too high threshold may cause the removal of certain samples of a single echo, shortening its length, and thus eliminating valid single detections and introducing bias in TS estimates.

### 2.3 Adaptive Expectation Maximization and Smoothing Method

Indirect target strength estimation methods are employed with data from single-beam echosounders and allow the compensation of the transducer beam pattern without phase information about the relative position of fish with respect to the transducer. Such methods were initially introduced by Craig & Forbes [5]. Subsequently, new methods capable of reducing bias in target strength estimates compared with traditional methods, have been developed, obtaining TS values close to those obtained by direct methods with dual-beam and split-beam echosounders[17][18]. Adaptive Expectation Maximization and Smoothing method, proposed in [15] is an evolution of the one presented in [9] and its bias in target strength

estimations is one of the lowest of existing methods [16]. Hence, it is set to be the algorithm implemented in the processing application submitted in this study.

The above method is included in nonparametric methods. These methods assume that acquired echoes from fish can be treated as a stochastic process. This reduces the sonar equation in logarithmic domain, so that the received echo level can be expressed as a sum of two independent random variables:

$$E = B + TS \quad (1)$$

Where  $E$  is the normalized echo level, which means the removal of range and source level dependences, and  $B$  is the random variable representing beam pattern of the transducer.

The probability density function (PDF) of a sum of two independent random variables, as in this case, is a convolution of PDF's components. This fact, applied to sonar equation, when normalized echo level is used, results in:

$$p_E(z) = \int_{-\infty}^{\infty} p_B(z-x)p_{TS}(x)dx \quad (2)$$

The solution of Eq.(2) leads to estimate target strength PDF, but beam pattern PDF knowledge is required in order to solve the integral equation.

Indirect target strength estimation methods, single-beam integral equation fundamentals, Eq. 2, determination of the

the transducer's pattern PDF and problems related to influence of threshold on beam pattern PDF are subject of extensive study by one of the authors of this work [16].

### 3 Results

#### 3.1 Uncompensated Target Strength distributions

Results extracted from single echo detection analysis are shown in Fig. 1. Uncompensated target strength distributions are presented for ventral case, class 4 (23.1 cm).

When echo length criterion is applied first, as in Sonar Pro5, similar results are obtained in both cases for all the classes studied, verifying the correct functioning of the processing application developed. When threshold is applied first, in opposition to the procedure followed by Sonar Pro, mean TSu higher than the one extracted from Sonar Pro is obtained for all the classes, both for dorsal and ventral recordings

In addition, a unimodal distribution is observed for all the classes in all the cases studied, contrary to what happens by applying echo length criterion first, where the presence of low level detections mask the main mode.

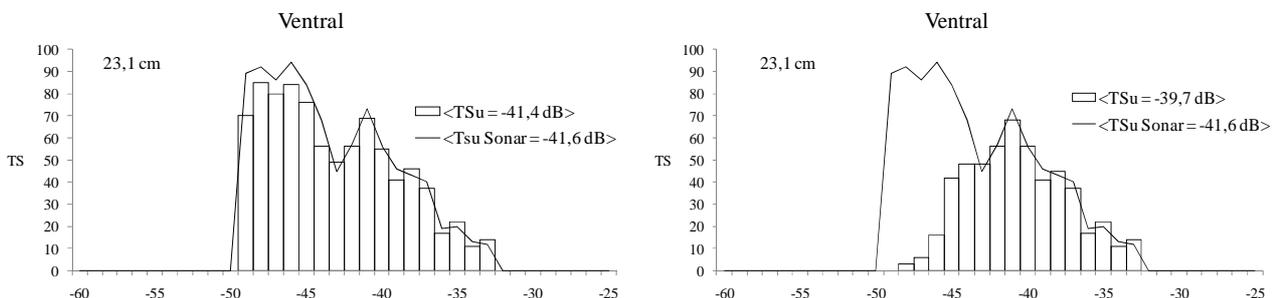


Figure 1. Comparisons between uncompensated target strength distributions for class 4 (23,1 cm), ventral measurements. Sonar5 Vs Echo length first (left), Sonar5 Vs threshold first (right).

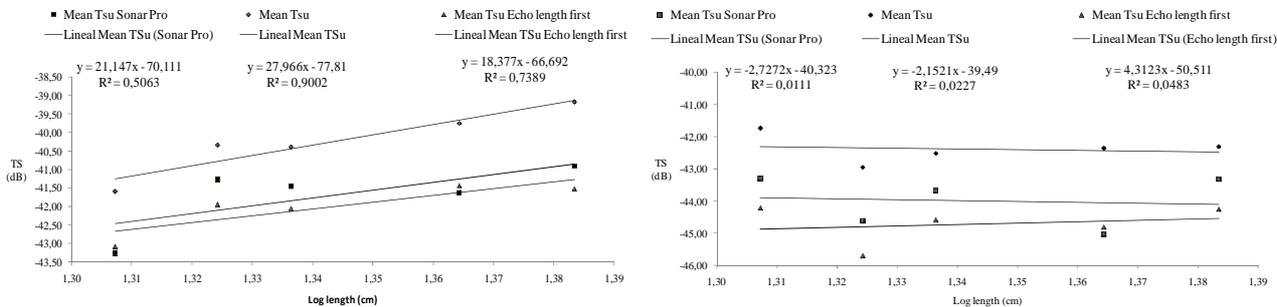


Figure 2. Uncompensated target strength to length relationship for ventral (left) and dorsal (right) recordings.

A good correlation is found between TS and fish length for ventral case when threshold application is made first, obtaining mean TSu values higher than those obtained using the other single echo detector version, as shown in Fig. 2. TS Vs fish length for this case is shown in Eq. 2

$$TSu = 27.97 * \log(L[cm]) - 77.81 \quad (2)$$

$$r^2 = 0.9002$$

The Correlation found when applying echo length criteria firstly is poorer than the previous.

Results obtained for dorsal case show a poor correlation between TSu and fish length using any of both versions of the processing application. The difference found between mean TSu for the five size classes studied is little, despite the fact that unimodal distributions are found for all the cases when applying threshold first.

### 3.2 Split beam VS Single beam

Comparisons made between TS distributions obtained by the use of direct and indirect techniques are shown for ventral case, class 4:

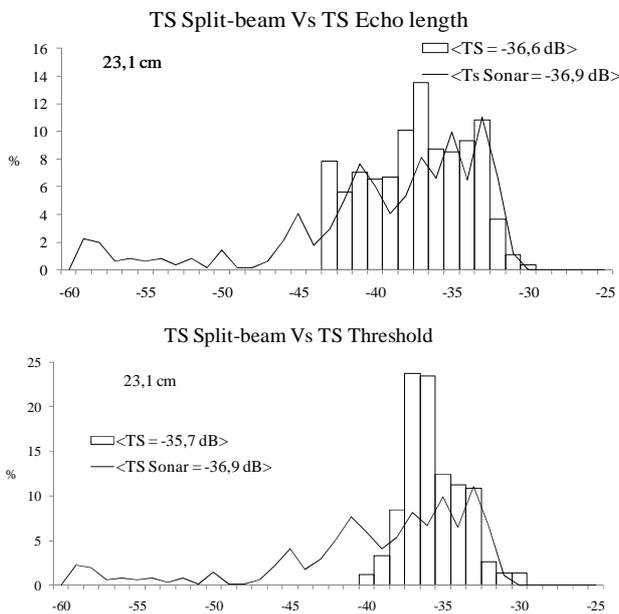


Figure 3. Comparison between TS distributions for ventral recordings, class 4. Split-beam VS Single-beam.

TS distributions follow a similar trend in the range -45 to -30 dB. There is no data below this range, for single-beam case, due to the limitation in dynamic range caused by threshold application [16].

TS distributions obtained using either Sonar Pro or the processing application does not form a unimodal distribution in most cases, mainly owing to the small number of individual detections recorded.

If threshold is applied firstly, mean TS values, higher than those extracted from Sonar Pro analysis are obtained, as noted previously for TSu distribution. The distribution is approximately unimodal, but more individual detections would be desirable in order to achieve a more uniform distribution

A certain correlation between TS and fish length is obtained using both Sonar Pro and the analogous version

of the processing application. When threshold is applied firstly a poor correlation is obtained.

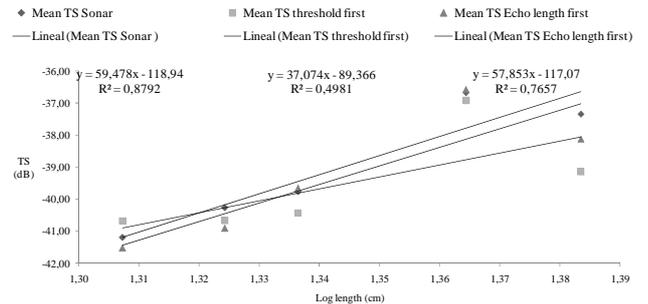


Figure 4. Target strength to length relationship for ventral recordings.

## 4 Discussion

Two different versions of the processing application have been developed. Satisfactory results, similar to those obtained using Sonar Pro are achieved when using the same procedure as this software to obtain TSu.

A linear relationship between TSu and fish length is found when threshold is applied firstly, as suggested in [12] for ventral case. However, it has been checked that the absolute values of the adjustment are sensitive to processing parameters, making it necessary to extend the analysis in future studies with a larger number of detections, in order to verify the feasibility of monitoring the growth of fish in sea cages by the use of uncompensated TS

Results obtained for dorsal case follow the same trend as those presented in [18], which showed the difficulty in obtaining correlation between TS and fish length

Comparisons between TS distributions for single-beam and split-beam are comparable only in the range from -45 to -30 dB, where a similar trend is observed, due to the limitation caused by threshold application in the single echo detector [16], together with the low number of individual detections registered. This fact prompts that a significant number of non-single detections are considered as valid ones. Nevertheless, the efficiency of the inverse technique employed is demonstrated by comparing the results obtained with this method with those obtained by split-beam analysis, within the range discussed previously.

The results obtained allow verifying the proper functioning of the processing application when compared with reliable post processing software, such as Sonar Pro. However, the experiments must be considered preliminary, in order to develop the algorithms and criteria for analysis, lacking the optimal duration and number of detections in the measurements analyzed. Future studies will extend the analysis to a larger number of measurements and classes.

## 5 Acknowledgements

We would like to thank Helge Balk, one of the Sonar Pro5 software developers, for his valuable comments and kind support.

## References

- [1] APROMAR, “La acuicultura marina de peces en España, 2006, in spanish, www.apromar.es
- [2] T. Acker, J. Burczynski, J. Hedgepeth, AEbrahim, “Digital Scanning Sonar for Fish Feeding Monitoring in Aquaculture”. *Seattle: Biosonics Inc. http://www.biosonic sinc.com.* (2002)
- [3] H. Balk, T. Lindem, “Sonar 4 and Sonar 5-Pro Post-processing systems”. *Operator manual version 5.9.9.* (2008).
- [4] A. Bjordal, J. E. Juell, T. Lindem, A Fernö., “Hydroacoustic monitoring and feeding control in cage rearing of Atlantic salmon (*Salmosalar L.*)”. *I Fish Farming Technology.* Balkema, Netherlands, 203-208. (1993)
- [5] R. E. Craig and S. T. Forbes, “Design of a sonar for fish counting,” *Fiskeridir. Skr. Ser. Havunders.* 15, 210–219. (1969)
- [6] J. E. Ehrenberg, T. J. Carlson, J. J. Traynor, N. J. Williamson, “Indirect measurement of the mean acoustic backscattering cross-section of fish”. *Journal of the Acoustical Society of America*, 69: 955-962. (1981)
- [7] V. Espinosa, E. Soliveres, V. D. Estruch, M. Bou, G. Larosa, S. Martinez, M. Jover, “Gilt-head sea bream (*Sparus Aurata*) cross –section measurements for the acoustical control of sea farms”. *Acústica .Portugal.* (2008)
- [8] K. G. Foote, “Rather-high-frequency sound scattering by swimbladdered fish”. *Journal. Acoustical. Society of. America*, 78: 688–700. (1985)
- [9] J. B. Hedgepeth, V. F. Gallucci, F. O’Sullivan, R. E. Thorne, “An expectation maximization and smoothing approach for indirect acoustic estimation of fish size and density”. *ICES Journal of Marine Science*, 56: 36–50. (1999)
- [10] J. K. Horne, P.D. Walline, J. M. Jech, “Comparing acoustic model predictions to *in situ* backscatter measurements of fish with dual-chambered swimbladders”. *Journal of fish Biology.* 57: 1105-1121. (2000)
- [11] F.R. Knudsen, J. E. Fosseidengen, F. Oppedal, Ø. Karlsen, E. Ona. “Hydroacoustic monitoring of fish in sea cages: target strength (TS) measurements on Atlantic salmon (*Salmosalar*)”. *Fisheries Research*, 69: 205-209. (2004.)
- [12] E. Ona. “Methodology for Target Strength Measurements”. *ICES Cooperative Research Report n° 235.* (1999)
- [13] D. N. MacLennan, E. J. Simmonds, “Fisheries Acoustics”. *Chapman & Hall.* (1992).
- [14] S. McClatchie, J. Alsop, R. F. Coombs, “A re-evaluation of relationships between fish size, acoustic frequency, and target strength”. *ICES Journal of Marine Science.* 53: 780–791. (1996)
- [15] M. Moszynski, “Adaptive Expectation Maximization Smoothing (AEMS) inverse technique for indirect fish target strength estimation”. *Proc of ICES Symposium on Fisheries and Aquatic Ecology.* Montpellier.
- [16] M. Moszynski, “Statistical analysis for digital processing of pelagic fish echoes”. *Politechnika Gdanska Monografie 66.* (2005)
- [17] M. Moszynski, “Indirect Methods of Fish Target Strength Estimation in Absolute and Logarithmic Domain”. *Acta Acustica United with Acoustica.* 88, 726-729. (2002)
- [18] L. G. Rudstam, S. Hansson, T. Lindem, D. W. Einhouse, “Comparison of target-strength distributions and fish densities obtained with split- and single-beam echosounders.” *Fisheries Research*, 42: 207-214. (1999)
- [19] E. Soliveres, V. Espinosa, J. Redondo, E. Escuder, J. Alba, M. Ardid, V. D. Estruch, S. Martinez, A. Tomás, M. Jover, “Acoustical study of the gilt-head sea bream in reverberating tank”. *2º International Conference & Exhibition on “Underwater Acoustics Measurements: Technologies & Results”.* (2007)
- [20] X. Xu, X. Zhang, “A remote acoustic monitoring system for offshore aquaculture fish cage”. *Oceans’02 MYS/IEEE*, 4: 2488-2496. (2002)



## 41º CONGRESO NACIONAL DE ACÚSTICA 6º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA

### **Anexo 3. Medida del target strength dorsal y ventral de la dorada (*SparusAurata*) en jaulas marinas, empleando métodos directos e indirectos**

#### **MEDIDA DEL TARGET STRENGTH DORSAL Y VENTRAL DE LA DORADA (*SPARUS AURATA*) EN JAULAS MARINAS, EMPLEANDO MÉTODOS DIRECTOS E INDIRECTOS**

PACS: 43.30-GV

Alejandro Cebrecos, Ester Soliveres, MarekMoszynski y Víctor Espinosa  
Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC)  
Universidad Politécnica de Valencia  
c/ Paranimf, 1  
46730 Grau de Gandia, Valencia  
Telf. 96 284 93 68  
Fax 96 284 93 37  
[alcebrui, essogon, vespinos@upv.es, marmo@eti.pg.gda.pl](mailto:alcebrui, essogon, vespinos@upv.es, marmo@eti.pg.gda.pl)

#### **ABSTRACT**

The aim of this study is to establish a relationship between target strength (TS) and total body length of gilthead sea-bream (*Sparusaurata*) in sea cages. Gilt-head sea-bream is the species of most economic interest in the Mediterranean Sea aquaculture. Five classes of commercial size gilt-head sea-bream are characterized from 20 to 25 cm. A few specimens are introduced into a 3 m in diameter and 2.7 m in height sea cage, and monitored using a Simrad EK60 split-beam echosounder working at 200 kHz. Measurements are made with one transducer located in the centre of the cage, at the bottom facing upwards for ventral measurements and on the surface facing down to perform dorsal measurements. We perform two analysis, one takes into account all data and in the other we omit the phase information

#### **RESUMEN**

El objetivo de este estudio es establecer una relación entre el target strength (TS) y la longitud total de la dorada (*Sparusaurata*) en jaulas marinas. La dorada es una de las especies de mayor interés económico en la acuicultura mediterránea. Se caracterizan 5 clases de tamaños comerciales de dorada desde 20 hasta 25 cm. Se introducen unos pocos ejemplares en una jaula de 3 m de diámetro y 2.7 de alto, que se monitorizan con una ecosonda split-beam EK60 de Simrad trabajando a 200 kHz. Las medidas se realizan con un transductor localizado en el centro de la jaula, en el fondo hacia arriba para las medidas ventrales y en la superficie hacia abajo para las medidas dorsales. Se realizan dos análisis, en uno se tienen en cuenta todos los datos y en otro se omite la información de fase.

#### **INTRODUCCIÓN**

En los últimos años la acuicultura marina ha aumentado considerablemente debido a la escasez de recursos pesqueros. Según la FAO, una extracción mundial superior a 10 millones de toneladas al año podría causar cambios ecológicos irreversibles en los recursos marinos. En España, el tercer productor piscícola de la Unión Europea, este aumento se debe fundamentalmente al cultivo de la dorada (*Sparusaurata*) y la lubina (*Dicentrarchuslabrax*), que supone el 95 % de la producción piscícola total [1]. La dorada es una de las especies más interesantes para su cultivo en la cuenca mediterránea. Se cultiva mediante un sistema de jaulas flotantes y su producción queda limitada a zonas de aguas templadas.

La estimación de la tasa de crecimiento y la biomasa de peces son esenciales en la preparación del plan de producción de granjas de peces, así como en tareas de gestión tales como la clasificación y distribución de los peces, la descarga de nuevos lotes, cálculo de las tasas de alimentación diaria, etc. Es necesario optimizar estos procesos de producción, no sólo para mejorar la rentabilidad económica, sino también para minimizar el impacto ecológico de las explotaciones. Entre estos procesos cabe destacar la estrategia de alimentación, el seguimiento del crecimiento y la vigilancia de la población. La alimentación diaria se estima en función de la biomasa presente en la jaula y de diversos factores como son el tamaño medio de los peces, la estación del año, la temperatura del agua, etc. Por tanto, el tamaño y la estimación del número de peces en el interior de cada jaula son datos cruciales para una gestión adecuada de la explotación.

Se han realizado numerosas campañas de medidas del TS en aplicaciones de pesquerías, principalmente del aspecto dorsal del TS medido *in situ* [7,8]. En [10] se resumen los resultados obtenidos en la relación entre el TS y la longitud del pez para varias especies de peces, mayormente especies que presentan vejiga natatoria. Sin embargo, en jaulas marinas se ha realizado un reducido número de estudios, principalmente con caballa y arenque [4], más recientemente, se ha estudiado el TS del salmón medido tanto dorsal como ventralmente [8]. Es importante medir el TS en el interior de una jaula debido a varios motivos: por un lado el comportamiento del pez varía al enjaularlo, lo que condiciona sus propiedades acústicas, y por otro lado las medidas realizadas en jaulas marinas presentan algunas complicaciones, puesto que los peces se encuentran cerca del transductor. La orientación y el comportamiento de los peces, así como el volumen de la vejiga natatoria, influyen en los valores de TS resultantes, con variaciones que pueden llegar a más de 10 dB. A pesar de estas variaciones, resulta posible distinguir acústicamente varias clases de peces de diferentes tamaños, siempre que se registre un elevado número de detecciones individuales [13]. En las medidas realizadas en jaulas se ha de tener en cuenta que el campo cercano de un pez puede alcanzar varias decenas de metros, lo que podría causar la dependencia del TS con la distancia y por tanto las medidas de TS en jaulas podrían no ser válidas. A cortas distancias los peces no actúan como fuente puntual, por lo que será necesario estimar la función TVG apropiada para estimar correctamente el valor del TS [3,11]. Además a cortas distancias existe una variabilidad considerable en la estimación de la posición del pez dentro del haz, lo que introducirá un nuevo error en la estimación del TS [3].

Muchas especies de peces, incluidos el besugo, dorada, lubina, atún, salmón y arenque, entre otros, cuentan con vejiga natatoria. Este órgano, situado por debajo de la columna vertebral del pez, es responsable de la mayor parte de la energía reflejada por los peces [5,6,9]. Por lo tanto, la realización de medidas ventrales en jaulas marinas es muy recomendable, ya que es probable que se obtenga mejor correlación entre el TS y la longitud del pez que la obtenida para el caso dorsal. En las medidas ventrales probablemente no se producirá el efecto de apantallamiento de la vejiga natatoria por estructuras duras del pez (espina dorsal).

Aunque se han desarrollado diferentes técnicas para el control de granjas marinas, el alto precio de los equipos comerciales hace difícil su instalación permanente en las jaulas. Puesto que las ecosondas single-beam son el sistema más económico entre las ecosondas científicas

existentes, este tipo de ecosonda puede ser una opción conveniente para su instalación de piscifactorías. Para confirmarlo, es necesario verificar la viabilidad del control del crecimiento, abundancia y alimentación de peces en jaulas marinas empleando este tipo de sistema.

El objetivo de este trabajo es hallar la relación entre el TS y la longitud total de la dorada en jaulas marinas, donde los ejemplares se encuentran muy próximos al transductor. Se pretende evaluar la relación obtenida a partir los datos que proporciona el transductor split-beam y contrastarla con la obtenida en caso de omitir la información de fase, es decir, tratando los datos como si se hubieran realizado con una ecosonda single-beam. El conocimiento de esta relación es muy relevante para la gestión de piscifactorías mediante el uso de técnicas acústicas. Además se pretende comprobar el correcto funcionamiento de una aplicación desarrollada para la lectura y procesado de los datos procedentes de un transductor single-beam, con el fin de lograr un sistema single-beam asequible, capaz de soportar largos periodos de tiempo en una piscifactoría.

Con este trabajo pretendemos continuar con la caracterización de la dorada, que iniciamos con la medida del TS en un tanque reverberante [5,13], y la implementación de una ecosonda single-beam para su uso en jaulas marinas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Medidas Experimentales

Se han caracterizado 5 clases de tamaño diferentes de dorada para hallar la relación entre el TS dorsal y ventral de ejemplares individuales de dorada con su tamaño. Tanto las mediciones biométricas como las acústicas tuvieron lugar en julio de 2009.

En primer lugar, se midió la longitud y el peso de los diferentes ejemplares, previamente anestesiados, y se clasificaron en 5 clases de tamaño diferentes comprendidas entre 20 y 25 cm, de forma que la dispersión de longitud dentro de cada clase fuera lo menor posible. En la Tabla 1 se resumen la masa y la longitud total promedio de los especímenes de cada clase, así como el coeficiente de variación de la longitud total y el número de ejemplares en el interior de la jaula. La clasificación por tamaño cubre una gran parte de las tallas comerciales.

*Tabla 1. Descripción de cada clase de tamaño de dorada.*

Clase	1	2	3	4	5
<b>Nº ejemplares</b>	2 - 4	2 - 4	2 - 8	2	2 - 4
<b>Masa (g)</b>	158.8	178.7	194.4	235.7	268.7
<b>Long (cm)</b>	20.3	21.1	21.7	23.1	24.2
<b>CV Long (%)</b>	0.25	0.42	0.51	0.55	0.42

A continuación, se midió de forma directa el TS ventral y dorsal de ejemplares individuales. Las medidas se llevaron a cabo en el puerto de Gandia (Valencia). Se introdujo un número reducido de ejemplares de cada una de las clases en una jaula de tamaño reducido (3 m de diámetro y 2.7 m de altura), evitando así el solapamiento de ecos procedentes de múltiples blancos que pudieran falsear las detecciones de ecos procedentes de un blanco individual y sobreestimar el TS medio [12]. Una vez introducidos los peces en la jaula, se les deja un cierto tiempo para que se habitúen a su nuevo entorno antes de comenzar las mediciones. Unos días antes de realizar las mediciones se dejó de suministrar alimento.

## 41º CONGRESO NACIONAL DE ACÚSTICA 6º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA

Se emplea una ecosonda EK60 de Simrad con un transductor splitbeam de 7º, trabajando a 200 kHz y con el máximo del campo cercano próximo a 1 m, para la medida directa del TS. El transductor se monta en el centro de la jaula, en el fondo orientado verticalmente hacia arriba para medir el TS ventral y en superficie orientado hacia abajo para medir el TS dorsal (Fig. 1). La potencia transmitida es de 90 W, la longitud del pulso de 64  $\mu$ s y el intervalo entre pings de 20 ms. Durante las mediciones se realiza un seguimiento de la temperatura del agua. Antes de introducir los peces en la jaula y comenzar a medir, se calibra el transductor en su interior empleando una esfera de calibración de cobre de 13.7 mm de diámetro [9].



Fig. 1. Detalle de montaje del transductor en el fondo de la jaula.

Se realizan medidas durante aproximadamente una hora para cada tipo de medida (versal, ventral) y clase de tamaño. Los datos registrados se almacenan en ficheros .raw para su posterior análisis.

### Análisis De Los Datos

Los datos se analizan con el programa Sonar 5 Pro versión 5.9.9 [2]. Las distribuciones de TS se basan en el análisis de ecos individuales, ya que no se dispone de suficientes detecciones para realizar un análisis por trazas. En primer lugar, se reduce el ruido o los ecos indeseados presentes en el ecograma empleando el 'target-noiseseperation'. Seguidamente se analiza por conteo de ecos una capa que abarca desde una distancia de 1 m a partir del transductor hasta 2.35 m. No se analizan distancias más cercanas a 1 m para evitar el efecto del campo cercano del transductor, y superiores a 2.35 m para evitar el eco de superficie o del fondo de la jaula, así como el ruido procedente de burbujas debidas al oleaje, objetos flotantes, etc. Puesto que se dispone de pocas detecciones, en algunos casos ha sido necesario eliminar manualmente el ruido restante para reducir el efecto de inclusión de ecos indeseados en la distribución de TS. Se consideran detecciones de ecos individuales aquellas con un valor superior a -60 dB para las grabaciones ventrales y a -70 dB para las grabaciones dorsales, una longitud de pulso entre 0.8 y 1.8 relativa al ancho del pulso emitido, una compensación de ganancia máxima en una dirección de 6 dB, y una desviación de fase máxima de 0.5.

Los resultados que proporciona Sonar Pro se analizan estadísticamente para obtener el TS medio, en dominio lineal, de cada clase de tamaño. Por último se realiza un ajuste lineal por mínimos cuadrados para hallar la relación entre el TS medio y el logaritmo de la longitud del pez. Además se ha estudiado la dependencia del TS con la distancia, analizando el valor medio del TS en capas de espesor reducido.



## 41º CONGRESO NACIONAL DE ACÚSTICA 6º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA

Se realiza un segundo análisis con los mismos datos empleando una aplicación de procesado desarrollada en Matlab que se basa en un detector de ecos individuales que trata los datos como si provinieran de una ecosonda single-beam. Para ello, se omite la información angular al realizar la lectura y conversión de los ficheros .raw. En este caso también se realiza el análisis por conteo de ecos pero sin reducción de ruido, por lo que la capa de análisis se reduce de 1 a 2 m para tratar de evitar ecos indeseados. El valor del umbral se fija en -50 dB, la longitud de los ecos admitidos se acota entre 0.8 y 1.8 relativa al ancho de pulso transmitido, y se fija un espaciado mínimo entre ecos igual a la longitud del pulso (4 muestras).

Se emplean dos versiones diferentes de la aplicación de procesado. La diferencia entre ambas radica en el orden en el que se aplican dos de los filtros existentes en el detector de ecos individuales, el umbral y el criterio de longitud de eco. Si se aplica el criterio de ecos en primer lugar, de forma similar al funcionamiento del Sonar Pro 5, la señal registrada no se modifica antes de pasar por el detector de ecos individuales y todos los ecos detectados tendrán una longitud acorde a la especificada, pero la aplicación posterior del umbral provoca la obtención de ecos con una longitud inferior a la fijada en el criterio de longitud de ecos. Si se aplica el umbral el primer lugar, como se sugiere en [12], todos los ecos almacenados para el análisis tendrán una longitud acorde a la especificada. Sin embargo, en este caso, la aplicación de un umbral demasiado elevado puede provocar la eliminación de ciertas muestras de ecos de bajo nivel (ecos fuera de eje de máxima radiación del transductor).

Los resultados obtenidos se analizan estadísticamente para la obtención tanto del TS medio sin compensación de fase (TSu). En todos los casos se realiza la conversión al dominio lineal para calcular los valores medios. También se realiza un ajuste lineal por mínimos cuadrados para hallar la relación entre ambos parámetros y el logaritmo de la longitud del pez.

## RESULTADOS

### Dependencia Del TS Con La Distancia

Los efectos de campo cercano que pueden afectar a la medida del TS han sido ampliamente expuestos en [8], y el menos importante de ellos es el efecto de variación de la presión sobre el volumen de la vejiga natatoria, que puede ser insignificante en comparación con la violación de fuente puntual, la medida en campo cercano de los peces, o el hecho de que no se insonifique totalmente el pez a ciertas distancias.

La Fig. 2 muestra el TS de cada detección y su distancia para las medidas ventrales de la clase 5, correspondiente a los peces de mayor tamaño. Se representa el TS medio de capas de 10 cm. El TS medio por capas tiende al valor medio de todas las detecciones cuando se tiene un elevado número de detecciones en la capa, mientras que se tienen grandes variaciones en aquellas capas con pocas detecciones. No se identifica una variación clara del TS con la distancia.

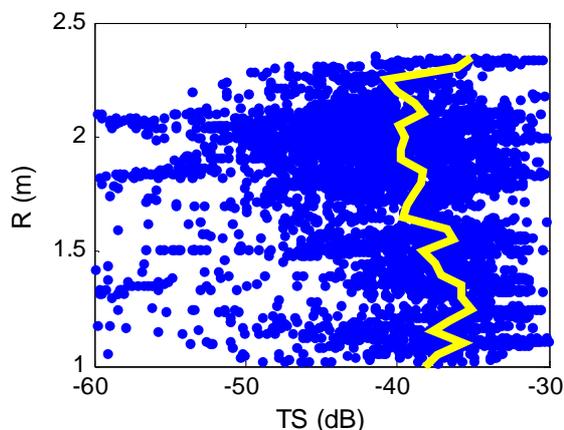


Fig. 2. Valores de TS en función de la distancia (puntos), y TS medio de capas de 10 cm de espesor (línea amarilla) para las medidas ventrales de la clase 5.

### Relación Entre El TS Y La Longitud Total

#### Análisis split-beam

La Fig. 3 muestra la distribución de TS para la clase 1, la de menor tamaño, y clase 4, la segunda de mayor tamaño, a una frecuencia de 200 kHz. Tanto las medidas dorsales como ventrales muestran una distribución del TS unimodal.

Se halla una buena correlación entre el aspecto ventral del TS y el logaritmo de la longitud total de la dorada. Sin embargo, para las medidas dorsales el TS medio fluctúa considerablemente entre clases consecutivas, con una relación no monotónica con la longitud (Fig. 4). Además se ha de tener en cuenta que el TS medio para las medidas ventrales es superior que el obtenido para las medidas dorsales.

Tratando de determinar la relación entre el TS ventral y la longitud total de la dorada, se ha notado que todos los análisis realizados a la clase 5 con diferentes parámetros y criterios han mostrado un resultado inferior al esperado. En todos los casos la tendencia general del resto de clases es un incremento lineal del TS con el logaritmo de la longitud total.

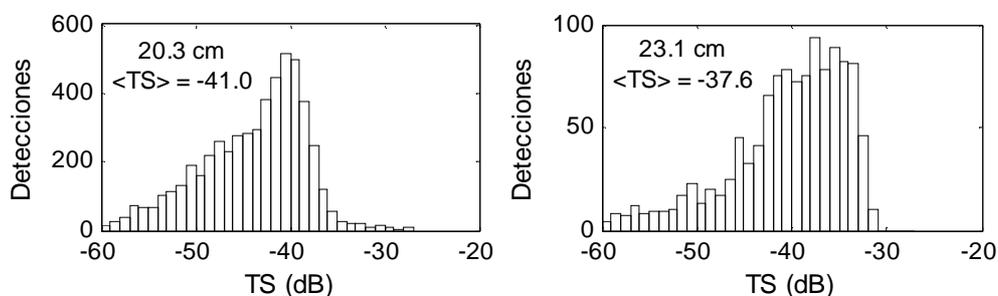


Fig. 3. Distribución del TS ventral para la menor clase (20.3 cm) a la izquierda, y la segunda mayor clase (23.1 cm) a la derecha.

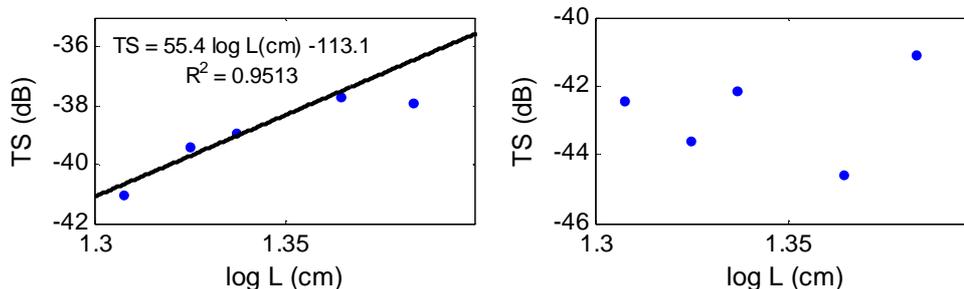


Fig. 4. Relación entre el TS y el logaritmo de la longitud total, en centímetros, de la dorada, tanto para las medidas ventrales (a la izquierda) como para las dorsales (a la derecha).

Se ha observado que el TS medio de la clase 5 se vio afectado por una fuerte dispersión inducida por ecos o ruido de bajo TS y de origen desconocido, no presente los datos del resto de clases. Eliminando manualmente estos ecos del ecograma, el TS medio tiende a aumentar ligeramente. También se ha considerado que esta clase corresponde a los peces de mayor tamaño, y por tanto las consecuencias de compensación del haz, debidas al error de estimación de la posición del pez dentro del haz de tamaño similar al pez, podrían ser mayores. De esta forma se obtendría una subestimación del TS.

Descartando la clase 5, se halla la siguiente relación lineal entre el TS ventral y el logaritmo de la longitud total:

$$TS = 55.4 \cdot \log L(cm) - 113.1 \quad (1)$$

$$r^2 = 0.9513$$

Para este ajuste, se puede observar en la Fig. 4 que la clase 5 parece tener un TS 1.5 dB inferior al esperado.

Al incluir la clase 5 en el ajuste la pendiente se reduce a entorno 30, pero se obtiene un coeficiente de correlación mucho más pobre (cercano a 0.7).

### Análisis single-beam

Los resultados obtenidos empleando la aplicación de procesamiento desarrollada, se muestran en la Fig. 5 para las medidas ventrales de la clase 5. En el lado izquierdo se muestra la distribución de TSu obtenida con la versión de la aplicación análoga al Sonar Pro 5, en la que en primer lugar se emplea el criterio de longitud de ecos, y se compara con la obtenida mediante Sonar empleando los mismos parámetros de análisis. En el lado derecho se muestra la distribución obtenida cuando se emplea la versión de la aplicación en la que el umbral se aplica en primer lugar. En el primer caso se obtienen distribuciones análogas en todos los clases estudiadas, tanto para las medidas ventrales como para las dorsales. De esta forma se verifica el correcto funcionamiento de esta versión de la aplicación de procesamiento. En el otro caso, cuando se aplica primero el umbral, se obtienen distribuciones unimodales en todos los casos, probablemente debido a la eliminación de detecciones de bajo nivel como resultado del empleo de un umbral elevado.

Se observa una buena correlación entre el TSu y la longitud del pez en el caso ventral cuando se aplica el umbral en primer lugar, obteniendo valores medios del TSu superiores a los que se obtienen con la otra versión de la aplicación (Fig. 6). En el caso dorsal los resultados no

ofrecen relación lineal alguna, de forma similar a lo observado en el análisis split-beam mostrado anteriormente.

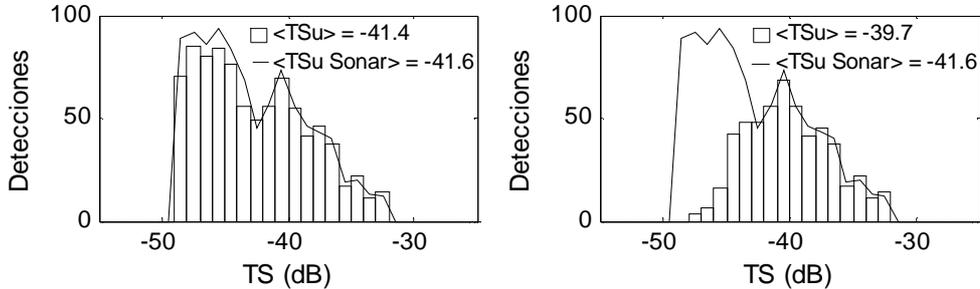


Fig. 5. Distribución del TSu ventral para la clase 4 (23.1 cm). Criterio de longitud de ecos en primer lugar (izquierda). Umbral en primer lugar (derecha)

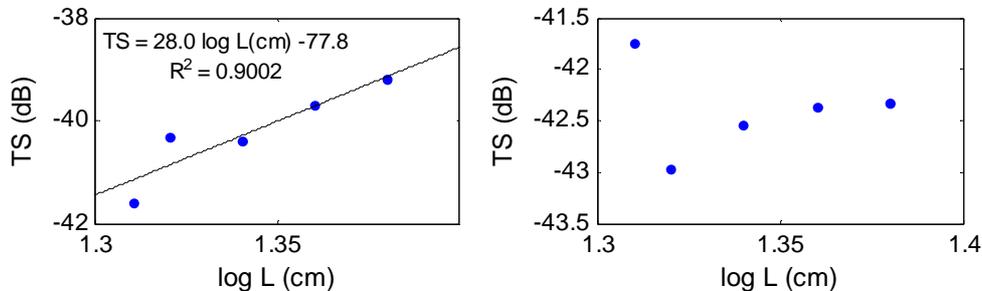


Fig. 6. Relación entre el TSu y la longitud total de la dorada, tanto para medidas ventrales (a la izquierda) como para las dorsales (a la derecha) analizadas aplicando en primer lugar el umbral.

La presencia de ecos o ruido de bajo nivel en la clase 5 no ha tenido la misma influencia que en el análisis split-beam debido a que la aplicación del umbral en primer lugar provoca la eliminación de este tipo de detecciones por lo que esta clase se incluye a la hora de establecer una relación en TSu y longitud.

La relación obtenida entre el TSu y el logaritmo de la longitud total para la totalidad de las clases, en el caso ventral, se muestra en la Ec. 2:

$$TSu = 28.0 \cdot \log L(\text{cm}) - 77.8 \quad (2)$$

$$r^2 = 0.9002$$

## CONCLUSIONES

Se esperaba hallar cierta dependencia del TS con la distancia debido a diversos motivos: los peces se insonifican parcialmente, se introduce un error en la compensación de peces no puntuales, y las medidas están realizadas en campo cercano del pez [3,8,11]. Sin embargo, no se ha observado una tendencia clara, pero sí una fuerte dependencia del TS medio con el número de detecciones en la capa. Se podría esperar encontrar un TS medio creciente con la distancia, cuya evolución sería del mismo orden para todas las clases puesto que no se tienen grandes diferencias de longitud entre clases. A pesar de ello, la Fig. 2 se puede apreciar que el TS no aumenta con la distancia. Esta variación ha sido observada solo ligeramente para la clase de menor tamaño. El estudio se realizó a muy cortas distancias, y tal vez sea necesario



## 41º CONGRESO NACIONAL DE ACÚSTICA 6º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA

ampliar el estudio a mayores distancias, donde se podría aclarar si el error de fase afecta a todas las clases de la misma forma, y disponer un mayor número de detecciones.

Se han encontrado trazas de peces individuales a cortas distancias, incluso cuando la longitud del pez es mayor que el diámetro del haz acústico. Esto puede deberse a que la vejiga natatoria refleja el 90% o más de la energía reflejada [9], por lo que podría ser más razonable considerar la longitud de la vejiga natatoria en lugar de la longitud total del pez.

La vejiga natatoria como elemento de dispersión aún ocupa una gran parte de la sección transversal del haz acústico a cortas distancias, por lo que incluso será necesario corregir la función TVG para obtener el valor correcto del TS. Aún así se seguirán teniendo errores de fase.

Las distribuciones de TS halladas con unimodales, tanto para las medidas ventrales como para las dorsales. Esto podría explicarse por la reducida directividad que presentan los ejemplares estudiados, ya que el tamaño de la vejiga natatoria es solo ligeramente mayor a la longitud de onda.

Al igual que otras especies de peces [8], el TS para las grabaciones dorsales es menor que para las ventrales, posiblemente debido al efecto de apantallamiento de la vejiga natatoria por las estructuras duras del pez. No se ha hallado una relación clara entre el aspecto dorsal del TS y el logaritmo la longitud total de la dorada.

La relación lineal obtenida entre el TS ventral y el logaritmo de la longitud total de la dorada muestra una buena correlación. No obstante, se ha de considerar cuidadosamente, ya que se tuvo que descartar la información de la clase de mayor tamaño para obtener el ajuste lineal. Esto puede considerarse de alguna forma arbitrario, y se considera necesario ampliar las estadísticas para un mayor número de clases y un mayor número de detecciones de peces individuales o de trazas.

Se comprueba el correcto funcionamiento de la aplicación de procesado desarrollada, obteniendo resultados similares a los proporcionados por Sonar Pro 5 cuando se emplean los mismos criterios de análisis.

Se obtiene una relación lineal entre el TSu y el logaritmo de la longitud del pez, como se sugiere en [12] para el caso ventral, al igual que sucede con el TS. No obstante, se ha observado que los valores obtenidos son sensibles a los parámetros de procesado, por lo que resulta necesario extender el análisis en futuros estudios a un número de detecciones más elevado, pudiendo comprobar de manera más concluyente la idoneidad del uso del TSu como parámetro de monitorización del crecimiento de las doradas en jaulas marinas.

Los resultados obtenidos permiten verificar el correcto funcionamiento de la aplicación de procesado cuando se compara con un software de procesado fiable como Sonar Pro. Sin embargo, los experimentos presentados han de ser considerados como preliminares, con el objetivo de desarrollar los algoritmos y criterios de análisis, careciendo de una duración y número de detecciones óptimas en las medidas analizadas. Futuros estudios extenderán el análisis a un número más elevado de mediciones y clases.

Resaltar que la razón por la que se obtienen distribuciones unimodales al aplicar primero el umbral (TSu) está relacionado con la eliminación de detecciones de bajo nivel por el hecho de aplicar un umbral elevado

Tanto el TS como el TSu se podrían emplear para controlar el tamaño de los peces en el interior de una jaula, ya que se obtienen buenas correlaciones. Se ha de tener en cuenta que el TSu es prácticamente el TS debido a que se ha aplicado un umbral elevado en el análisis



## 41º CONGRESO NACIONAL DE ACÚSTICA 6º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA

single-beam, eliminando así los ecos procedentes fuera del eje. El TS presenta valores algo mayores que el TSu y una mayor pendiente. Los menores valores del TSu son de esperar, ya que no se compensan el patrón de directividad del transductor.

En conclusión, se ha llevado a cabo un estudio preliminar del TS ventral y dorsal de la dorada, que permite hallar una primera relación lineal entre el TS y el logaritmo de la longitud total. La evaluación de la configuración experimental y los métodos de análisis nos permitirá hacer un estudio más exhaustivo.

### AGRADECIMIENTOS

En especial dar gracias a Javier Zaragozá por su ayuda en el diseño y el montaje de la jaula, siempre apoyando más allá del deber, a Andrés Moñino (ICTA, UPV) por la manipulación de las doradas, y a HelgeBalk (desarrollador del Sonar Pro) por sus valiosos comentarios y amable ayuda. También debemos reconocer la colaboración de la Autoridad Portuaria de Valencia, Puerto de Gandía, por la colocación de la jaula en sus instalaciones.

### REFERENCIAS

- APROMAR, "La acuicultura marina de peces en España", (2009), [www.apromar.es](http://www.apromar.es)
- H. Balk, T. Lindem, "Sonar 4 and Sonar 5-Pro Post processing systems. Operator manual version 5.9.8", *University of Oslo*, Norway (2009).
- J.J. Dawson, D. Wiggins, D. Degan, H. Geiger, D. Hart, B. Adams, "Point-source violations: split-beam tracking of fish at close range", *Aquat. Living Resour.*13, 291-295 (2000).
- J.I. Edwards and F. Amstrong, "Measurement of the target strength of live herring and mackerel". *FAO Fish. Rep.*, 300:69-77 (1983).
- V. Espinosa, E. Soliveres, V. D. Estruch, M. Bou, G. Larosa, S. Martinez, M. Jover, "Gilt-head sea bream (*Sparus Aurata*) cross –section measurements for the acoustical control of sea farms". *Acústica .Portugal.* (2008).
- K. G. Foote, "Rather-high-frequency sound scattering by swimbladdered fish". *Journal.Acoustical.Society.of.America*, 78: 688–700. (1985)
- J. K. Horne, P.D. Walline, J. M. Jech, "Comparing acoustic model predictions to *in situ* backscatter measurements of fish with dual-chambered swimbladders". *Journal of fish Biology.*57: 1105-1121. (2000)
- F.R. Knudsen, J.E. Fosseidengen, F. Oppedal, Ø. Karlsen, E. Ona, "Hydroacoustic monitoring of fish in sea cages: target strength (TS) measurements on Atlantic salmon (*Salmosalar*)", *Fisheries Research* 69, 205-209 (2002).
- D.N. MacLennan, E.J. Simmonds, "Fisheries acoustics", Ed. Chapman & Hall (1992).
- S. McClatchie, J. Alsop, R. F. Coombs, "A re-evaluation of relationships between fish size, acoustic frequency, and target strength". *ICES Journal of Marine Science.* 53: 780–791. (1996).
- T. Mulligan, "Shallow water fisheries sonar: a personal view", *Aquat. Living Resour.*13, 269-273 (2000).
- E. Ona. "Methodology for Target Strength Measurements". *ICES Cooperative Research Report n° 235.* (1999)
- E. Soliveres, V. Espinosa, J. Redondo, E. Escuder, J. Alba, M. Jover, M. Ardid, V.D. Estruch, S. Martínez, A. Tomás, M. Jover, "Acoustical study of the gilthead sea-bream in a reverberating tank", *2nd International Conference & Exhibition on "Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results"*, Greece (2007).