

MODELACIÓN DE LA RESPUESTA ACÚSTICA DE PECES: APLICACIÓN A ENSAYOS DE LABORATORIO CON PERCAS (*Percichthys trucha*)

MODELLING THE FISH ACOUSTIC RESPONSE: APPLICATION TO LABORATORY ESSAYS ON PERCHES (*Percichthys trucha*)

J.D. González¹, S.B. Blanc*¹, I. Prario¹ y A. Madirolas²

¹ División Acústica Submarina – Dirección de Investigación de la Armada (DIIV) – UNIDEF (CONICET/MINDEF) – Laprida 201 – (1638) Vicente López – Pcia. de Buenos Aires – Argentina.

² Gabinete de Hidroacústica – Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP) – Paseo Victoria Ocampo N° 1 – Escollera Norte – B7602HSA – Mar del Plata – Argentina.
e-mail: silblanc@yahoo.com

Recibido 30/03/2012; aprobado 10/09/2012

Cuando se propaga sonido en un medio acuoso, éste encuentra a su paso gran cantidad y variedad de inhomogeneidades correspondientes a discontinuidades en las propiedades físicas del medio, tal como ocurre en el mar con las algas microscópicas fitoplanctónicas, zooplancton, partículas en suspensión, cardúmenes de peces, submarinos y gradientes térmicos y salinos. Esas inhomogeneidades producen dispersión acústica debido a la interacción entre la onda incidente y el medio dispersor. Este fenómeno depende de la frecuencia de la onda incidente, de las dimensiones y forma del dispersor y de sus propiedades físicas y las del fluido en el que se transmiten las ondas. Las técnicas actuales de medición con fuentes ultrasónicas de banda angosta, como las utilizadas en las ecosondas modernas, habituales en pesquerías, se basan en el fenómeno de dispersión acústica para obtener información sobre las propiedades físicas de los dispersores de volumen presentes en el océano, lo que constituye una herramienta para el sensado remoto de las mismas. Con el objetivo de calcular la dispersión acústica producida por diferentes elementos de volumen cuya forma puede ser geoméricamente descripta por esferoides prolados (pez, vejiga natatoria, vehículo submarino, etc.), se adoptó un sistema de coordenadas curvilíneas esferoidales proladas para resolver la ecuación de onda mediante separación de variables. De este modo se plantearon las condiciones de contorno en términos de superficies coordenadas aproximadamente coincidentes con las interfaces agua-medio dispersor, apropiadas para resolver la ecuación de onda y calcular la intensidad de la onda dispersada. Ello permitió el cálculo del parámetro Fuerza de Blanco (TS: “*Target Strength*”) que se utiliza en acústica submarina para caracterizar la intensidad del eco dispersado. En este trabajo se implementó un modelo para calcular las funciones esferoidales proladas, angulares y radiales, involucradas en la solución analítica de la ecuación de onda con condiciones de contorno para los casos de interface blanda y rígida. Sus predicciones fueron comparadas con datos experimentales de TS para el caso particular de retro-dispersión (*backscattering*), correspondientes a una especie de la fauna ictícola autóctona argentina (*Percichthys trucha*). Los datos de campo fueron medidos a 38 kHz en una experiencia usando jaulas de engorde de peces y una ecosonda de haz dividido (SIMRAD-EY500). Las primeras comparaciones entre los valores de TS promedio predichos por el modelo resultaron muy similares a los medidos (discrepancia menor que el 3%). Asimismo, los histogramas de TS generados con el modelo, considerando cierta distribución de ángulos de orientación del pez respecto del eje de haz, muestran un comportamiento análogo a las distribuciones de los TS medidos. El modelo se usó además para analizar la dependencia de TS máximos con la longitud total del pez, es decir, cuando el ángulo de orientación del eje mayor del esferoide es normal al eje acústico del haz, situación en la que el pez ofrece su máxima área efectiva al haz sonoro incidente. Los resultados se contrastaron además con datos experimentales reportados en la literatura, obteniéndose un acuerdo muy razonable.

Palabras Claves: dispersión acústica, esferoide prolado, vejiga natatoria

When sound is propagated in an aqueous medium, it intercepts a great amount and variety of inhomogeneities that form discontinuities in the physical properties of the medium such as it takes place at sea with microscopic algae, zooplankton, suspended particles, schools of fish, submarines and temperature and salinity gradients. These inhomogeneities produce acoustic scattering due to the interaction between the incident wave and the scatterer medium. This phenomenon depends on the incident wave frequency, the scatterer size and shape and on the physical properties of the fluid where waves are transmitted. Measurements current techniques using narrow band ultrasound sources are based upon the acoustical dispersion phenomenon in order to obtain information about the physical properties of the volume scatterers present in the ocean. Thus, scattering of sound constitutes a tool for remote sensing of the scatterers properties. A system of prolate spheroidal curvilinear coordinate system was adopted to solve the wave equation by separation-of-variables with the aim of computing the acoustical dispersion produced by different volume elements whose shape can be geometrically described with prolate spheroids (fish, swim bladders, submarine vehicle, etc.). In this way, when solving the wave equation and computing the scattered wave intensity, boundary conditions were expressed in terms of appropriate coordinate surfaces that are approximately coincident with the water-scatterer medium interface. This fact enabled the calculation of the Target Strength parameter (TS) which is used in underwater acoustics to characterize the scattered echo. In this paper a model was implemented to compute the angular and radial prolate spheroidal

functions, involved in the analytical solution of the wave equation with boundary conditions for the cases of rigid and soft interfaces. Its predictions were compared with TS experimental data for the particular case of backscattering produced by a native species of Argentinean fish fauna (*Percichthys trucha*). Field-data were measured at 38 kHz in an experiment using fish farming cages and a split-beam echo sounder (SIMRAD-EY500). First comparisons between average TS values predicted by the model resulted very similar to the measured ones (with a discrepancy less than 3%). Moreover, TS histograms generated by the model taking into account certain distribution of fish angle orientations regarding the beam axis, show behaviour analogous to the corresponding distribution of the measured TS. The model was also used to analyse the dependence of the maxima values of TS with the whole fish length, namely, when the orientation angle of the spheroid major axis is normal to the acoustic beam axis, that means situations where the fish presents the maximum effective area to the incident sound beam. When results were also contrasted with experimental data reported in the literature, a very reasonable agreement was obtained.

Key Word: acoustic scattering, prolate spheroid, swim bladder

I. INTRODUCCIÓN

En el campo de la Acústica Submarina, es bien conocido el hecho de que cuando se propaga sonido en el mar, éste encuentra a su paso gran cantidad y variedad de inhomogeneidades en lo que se refiere a dimensiones y composición (desde algas microscópicas, zooplankton, partículas en suspensión, peces, cardúmenes, vejigas natatorias de diversos peces, hasta vehículos submarinos o interfaces térmicas y salinas). Esas inhomogeneidades, al ser interceptadas por las ondas sonoras, provocan re-irradiación de parte de la energía acústica, generando el conocido fenómeno físico de dispersión acústica por elementos de volumen; y en particular, retro-dispersión, cuando se considera la que se dispersa en la dirección y sentido de retorno a la fuente (eco). El efecto producido por cada una de las inhomogeneidades sobre la propagación de sonido, es fuertemente dependiente de la frecuencia de la señal acústica (longitud de onda) y de las propiedades físicas del blanco (forma, dimensiones, ángulo de orientación, contrastes de densidad y velocidad de sonido).

Al abordar el problema de dispersión acústica provocada por elementos de volumen, para que el mismo quede completamente especificado, se requiere establecer ciertas hipótesis de trabajo respecto a la naturaleza de la radiación incidente sobre el “obstáculo” que actúa como elemento volumétrico dispersor del sonido (por ejemplo, onda compresional plana y armónica); la forma del dispersor (esfera, cilindro, esferoide prolado, etc.); y la naturaleza de la superficie exterior del “obstáculo” (dispersor rígido, aproximación usada para un vehículo submarino; líquido, como el cuerpo de ciertos peces⁽¹⁾; o blando como ciertos gases contenidos en un volumen cerrado tal como la vejiga natatoria de algunas especies de peces). Una vez establecidas estas hipótesis, puede ocurrir que el problema particular de dispersión bajo estudio, tenga o no una solución exacta. Generalmente, es posible obtener una solución exacta cuando la superficie exterior del obstáculo coincide con alguna superficie coordenada de un sistema de coordenadas curvilíneas y la cuando la ecuación diferencial en derivadas parciales que gobierna el fenómeno físico correspondiente, puede resolverse mediante el método de separación de variables.

El parámetro físico habitualmente usado para cuantificar la respuesta acústica de dispersores de volumen presentes en medios acuosos, se denomina

Fuerza de Blanco (TS: *Target Strength*). Este parámetro es, en definitiva, una medida relativa de la intensidad de la onda dispersada por el elemento volumétrico respecto a la intensidad de la onda incidente sobre el mismo.

Existen numerosas y variadas aplicaciones del fenómeno de dispersión acústica por elementos individuales de volumen. En particular, el conocimiento del parámetro acústico TS es de fundamental importancia para el diseño de sonares y de ecosondas destinadas a pesquerías; y recíprocamente, para estimaciones acústicas de Abundancia Numérica de dispersores, Biomasa, o simplemente “*stock*” de peces y otros organismos acuáticos.

En el presente trabajo se describe la implementación computacional de un modelo destinado a estimar el parámetro TS producido por elementos de volumen cuya forma corresponde a la de esferoides prolados, en medios líquidos. Para ello se adoptó un sistema de coordenadas curvilíneas esferoidales proladas y se resolvió la ecuación de onda mediante el método de separación de variables, modelándose el campo acústico como una combinación lineal de funciones esferoidales proladas, radiales y angulares^{(2), (3), (4), (5)}. El modelo implementado fue validado comparando sus resultados con resultados teóricos previamente reportados por otros autores^{(1), (2)}.

Asimismo, se presentan mediciones de TS a 38 kHz para el caso particular de ciertos peces autóctonos (*Percichthys trucha*) nadando libremente en jaulas de engorde de una planta de acuicultura. El modelo implementado fue utilizado para simular la respuesta acústica (parámetro TS en retro-dispersión) de las vejigas natatorias de la especie mencionada y los resultados obtenidos se compararon con dichas mediciones. Se utilizó también para simular la dependencia del parámetro TS con la longitud de los peces comparando los resultados simulados con otros datos experimentales reportados⁽⁶⁾.

II. REVISIÓN TEÓRICA

Parámetro SONAR del dispersor acústico

El parámetro Fuerza de Blanco, TS, está definido como⁽⁷⁾

$$TS \equiv 10 \log \left[\frac{I_s}{I_{inc}} \Big|_{r=1} \right], \quad (1)$$

donde I_{inc} es la intensidad de una onda incidente originada por una fuente lejana e I_s es la intensidad de la onda que devuelve el blanco en una determinada dirección, medida a una distancia de referencia $r = 1$ m (o $r = 1$ yd, según el criterio que se adopte) desde el centro acústico donde la onda es dispersada.

La posición de observación correspondiente al punto donde se mide I_s (ubicación del receptor), puede o no coincidir con la dirección de la onda incidente según se trabaje con una configuración SONAR mono-estática o bi-estática respectivamente. El caso particular en que la dirección de la onda dispersada (dispersador-receptor) coincide con la dirección de la onda incidente (fuente-dispersor), es la retro-dispersión acústica (*acoustic backscattering*) y el TS se designa como TS_{bs} .

En la definición establecida en la ec. (1), la razón entre intensidades puede ser expresada asimismo en términos de presiones acústicas, p ; o de potenciales o campos acústicos escalares, ψ , que para el caso de fluidos irrotacionales, verifican $\mathbf{v} = \nabla \psi$, donde \mathbf{v} es la velocidad de las partículas del fluido en el que se propaga el sonido.

El parámetro TS puede expresarse asimismo en términos de la sección eficaz diferencial, σ , que representa la razón entre la potencia acústica total dispersada y la intensidad incidente ^{(8), (9)}

$$TS = 10 \log \left[\frac{\sigma(\theta_{inc}, \varphi_{inc}, \theta_s, \varphi_s, \nu_0)}{A_{ref}} \right] \quad (2)$$

donde los ángulos θ_{inc} , φ_{inc} , y θ_s , φ_s son las coordenadas esféricas correspondientes a los vectores de onda incidente y dispersada, \mathbf{k}_{inc} y \mathbf{k}_s , respectivamente; ν_0 es la frecuencia acústica; y A_{ref} es el área unitaria.

La ec. (2) hace explícita la dependencia de TS con las direcciones de las ondas incidente y dispersada respectivamente, según se muestra en la Figura 1.

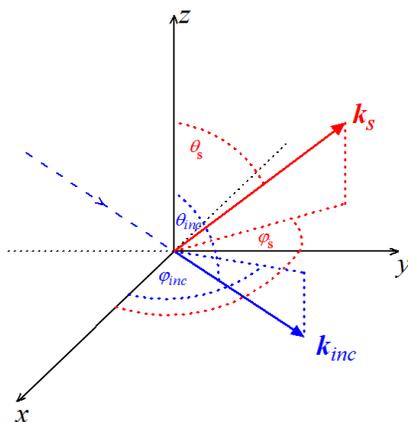


Figura 1. Esquema de los ángulos, en coordenadas esféricas, de los vectores de onda correspondientes a las ondas incidente y dispersada.

Coordenadas curvilíneas esferoidales proladas

El cálculo analítico del parámetro TS de cualquier objeto presente en el mar, con capacidad de producir un eco al ser sonorizado, es un problema matemáticamente

complejo. Lleva implícita la resolución de la ecuación diferencial de onda con condiciones de contorno sobre el objeto que dispersa parte del sonido que incide sobre él. Una forma de disminuir la complejidad mencionada es seleccionar un sistema de coordenadas curvilíneas apropiado para describir el espacio oceánico de tal manera que alguna de las condiciones de contorno pueda ser fácilmente expresable en ese sistema; más aún, que una de las superficies coordenadas del sistema adoptado coincida, al menos aproximadamente, con la interface que separa el medio oceánico del medio dispersor.

Dada la cantidad y variedad de cuerpos existentes en el medio marino con forma semejante a la de un esferoide prolado, tales como peces, vejigas natatorias de numerosas especies de peces, vehículos submarinos y ciertos organismos planctónicos, se justifica recurrir a una transformación, de coordenadas cartesianas a coordenadas esferoidales proladas,

$$T: (\xi, \eta, \varphi) \rightarrow (x, y, z)$$

a fin de modelar ciertos dispersores de volumen (ver Figura 2), expresadas como

$$\left. \begin{aligned} x &= (d/2) [(\xi^2 - 1)(1 - \eta^2)]^{1/2} \cos \varphi \\ y &= (d/2) [(\xi^2 - 1)(1 - \eta^2)]^{1/2} \sin \varphi \\ z &= (d/2) \xi \eta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

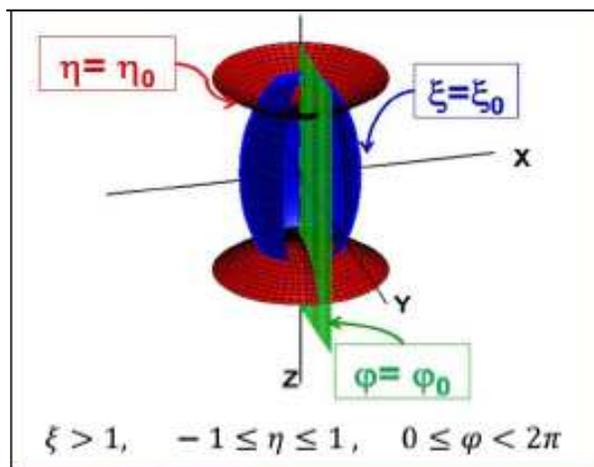


Figura 2: Superficies coordenadas esferoidales proladas.

Solución de la ecuación de onda en coordenadas esferoidales proladas.

Considérese la interacción de un campo acústico, Ψ_{inc} , proveniente de una fuente lejana (aproximación de onda plana) que emita ondas armónicas, incidentes sobre un esferoide prolado, sumergido en un medio líquido, homogéneo e infinito, cuyos semiejes mayor y menor son a y b , respectivamente, descrito por

$$\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{a^2} = 1. \quad (4)$$

Como consecuencia de la interacción entre Ψ_{inc} y el esferoide, se producirá una onda dispersada Ψ_s .

Mediante el método de separación de variables se plantea la solución a la Ecuación de Helmholtz en términos de las funciones esféricas proliadas^{(1), (4), (5)},

$$\psi(\vec{r}) = \psi(\xi, \eta, \varphi) = R(\xi) \cdot S(\eta) \cdot \cos(\varphi), \quad (5)$$

reduciendo así el problema de la resolución de la ecuación diferencial en derivadas parciales, al de la resolución de dos ecuaciones diferenciales ordinarias para las funciones esféricas proliadas radiales y angulares, $R(\xi)$ y $S(\eta)$, respectivamente,

$$\frac{d}{d\xi} \left[(\xi^2 - 1) \frac{dR_{mn}(h, \xi)}{d\xi} \right] - \left[\lambda_{mn}(h) - h^2 \xi^2 - \frac{m^2}{\xi^2 - 1} \right] R_{mn}(h, \xi) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d}{d\eta} \left[(1 - \eta^2) \frac{dS_{mn}(h, \eta)}{d\eta} \right] + \left[\lambda_{mn}(h) - h^2 \eta^2 - \frac{m^2}{1 - \eta^2} \right] S_{mn}(h, \eta) = 0, \quad (7)$$

donde los subíndices m, n corresponden a números naturales y el parámetro h se define como, $h = k \frac{d}{2}$, siendo d , la distancia interfocal del esferoide.

III. MODELACIÓN

Implementación del modelo numérico

Para una dada frecuencia, siguiendo la notación de otros autores^{(1), (2)}, para el caso de campo lejano, el cual se aplica a la situación que se busca modelar, el

parámetro TS, para una dada frecuencia, se puede expresar en términos de una *amplitud* o *función de dispersión a campo lejano* $f_\infty(\theta_{inc}, \varphi_{inc}, \theta_s, \varphi_s)$ que se relaciona con la sección eficaz diferencial definida en la ec. (2), mediante la siguiente relación:

$$|f_\infty(\theta_{inc}, \varphi_{inc}, \theta_s, \varphi_s)|^2 = \sigma(\theta_{inc}, \varphi_{inc}, \theta_s, \varphi_s) \quad (8)$$

La sustitución de la ec. (8) en la ec. (2), conduce a

$$TS = 10 \log \left[\frac{|f_\infty(\theta_{inc}, \varphi_{inc}, \theta_s, \varphi_s)|^2}{A_{ref}} \right] \quad (9)$$

Esta función de amplitud permite escribir la función de onda dispersada en el campo lejano como^{(1), (2), (3)}

$$\psi_s(\vec{r}) \xrightarrow{r \rightarrow \infty} f_\infty(\theta_{inc}, \varphi_{inc}, \theta_s, \varphi_s) \frac{e^{ikr}}{r} \quad (10)$$

donde $\psi_s(\vec{r})$, es una combinación lineal de las funciones esféricas proliadas que son soluciones de las ecs. (6) y (7). En condiciones de campo lejano se usan las igualdades

$$\eta = \cos(\theta_s) \quad \text{y} \quad kr = h\xi$$

Finalmente, a partir de la ec. (10) se obtiene, utilizando álgebra de límites, la siguiente expresión para la, $f_\infty(\theta_{inc}, \varphi_{inc}, \theta_s, \varphi_s)$, que es el argumento del parámetro TS.

$$f_\infty(\theta_{inc}, \varphi_{inc}, \theta_s, \varphi_s) = \frac{2}{j k} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} \frac{(-1)^n \epsilon_m}{N_{mn}(h)} A_{mn} S_{mn}^{(1)}(h, \cos \theta_{inc}) S_{mn}^{(1)}(h, \cos \theta_s) \cdot \cos m(\varphi_s - \varphi_{inc}) \quad (11)$$

donde $j^2 = -1$ y ϵ_m , es el factor de Neumann, tal que

$$\epsilon_m = \begin{cases} 2 & \text{si } m = 0 \\ 1 & \text{si } m \neq 0 \end{cases}$$

Las normas N_{mn} están dadas por

$$N_{mn}(h) = \int_{-1}^1 (S_{mn}^{(1)}(\eta))^2 d\eta$$

y los coeficientes A_{mn} dependen de las condiciones de contorno apropiadas para cada tipo de dispersor, siendo

$$A_{mn} = \frac{-\Delta R_{mn}^{(1)'}(h, \xi_0)}{\Delta R_{mn}^{(3)'}(h, \xi_0)}$$

donde $\Delta = 1$ para caso de dispersor blando,

$$\Delta = \frac{d}{d\xi} \text{ para caso de dispersor rígido.}$$

Para el cálculo numérico de la ec. (11), los límites superiores de las sumas infinitas fueron truncados en m_{\max} y n_{\max} , respectivamente, para los valores⁽¹⁰⁾

$$m_{\max} = [2kb] \quad \text{y} \quad n_{\max} = m_{\max} + [h/2],$$

donde $[]$ significa parte entera del argumento.

La implementación del modelo para calcular el parámetro acústico TS de esferoides proliados, se realizó, en parte, sobre la base de códigos computacionales, publicados previamente⁽¹¹⁾ con el objetivo específico de calcular numéricamente las autofunciones $R_{mn}(h, \xi)$ y $S_{mn}(h, \eta)$. (Ver Apéndice)

Las rutinas originales a las que se accedió⁽¹¹⁾ habían sido desarrolladas en Fortran 77. Durante la implementación efectuada, ellas fueron traducidas y adaptadas, a lenguaje MATLAB.

Cabe destacar que la implementación del modelo no queda restringida al cálculo numérico de las autofunciones (explicitadas en el Apéndice, ecs. (A.1), (A.2) y (A.3)), sino que implicó el desarrollo de nuevos códigos, aplicando técnicas tendientes a minimizar los tiempos de cómputo asociados, con el objeto de calcular el parámetro TS.

Validación del modelo contra resultados teóricos.

El modelo implementado se usó para calcular los parámetros TS para tres casos particulares de dispersión acústica cuyos resultados ya están perfectamente determinados en publicaciones de referencia^{(7), (2), (1)}.

Los tres casos modelados son: (A) Límite para esfera grande respecto a la longitud de onda; (B) Comparación con modelación de Spencer y Granger⁽²⁾; (C) Comparación con modelación de Furusawa⁽¹⁾.

(A) Un caso muy simple para calcular el parámetro TS analíticamente es el de la dispersión acústica isotrópica producida por una esfera de gran tamaño comparada con la longitud de onda acústica ($k_0 a = 2\pi a/\lambda_0 \gg 1$; a , radio de la esfera), caso bien estudiado por diversos autores mediante la aproximación de Kirchhoff o lo que se denomina dispersión geométrica ($k_0 a > 10$)^{(7), (8)}. Esta condición se plantea en el modelo considerando un esferoide prolado en el cual su semieje mayor, a , tiende al valor de su semieje menor, b , y además se cumple que $k_0 a \gg 1$.

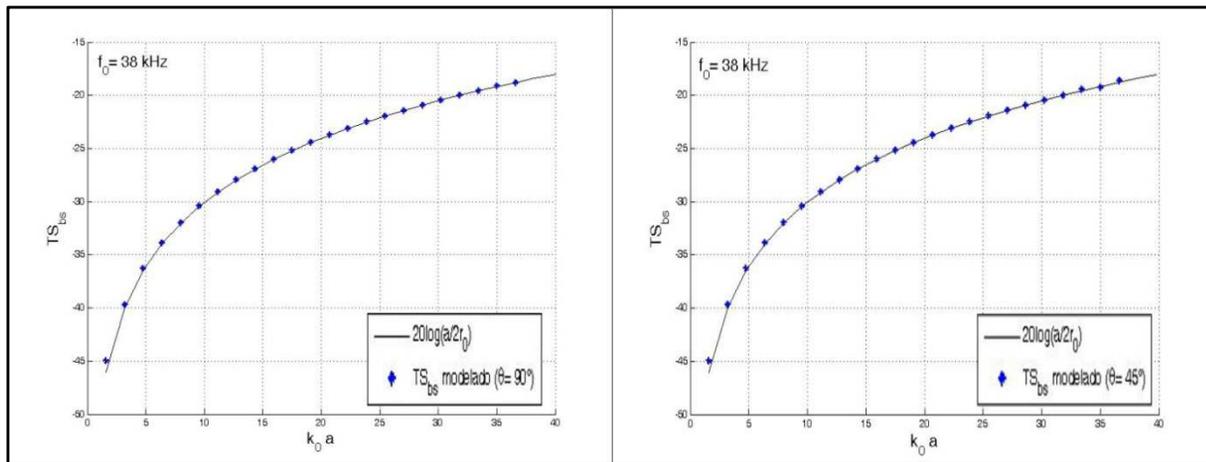


Figura 3: TS_{bs} obtenidos con el modelo para el caso límite en que un esferoide prolado tiende a una esfera blanda (de radio "a") para dos ángulos de incidencia (90° , izq. y 45° , der.). Los resultados se comparan con el valor analítico⁽⁷⁾.

(B) Con el modelo implementado se simularon los distintos casos presentados en el trabajo de Spence⁽²⁾, quien analiza la función de dispersión en función del ángulo de incidencia para distintos esferoides prolados (variando el parámetro h y ξ_0). Se observó total concordancia, tal como puede observarse en la Figura 4 para algunos casos ilustrativos.

(C) Se simularon diferentes condiciones de dispersión producida por esferoides prolados de estructura rígida y blanda de manera de poder comparar los resultados modelados con los obtenidos por Furusawa⁽¹⁾. En la Figura 5 se observan los resultados numéricos arrojados por el modelo para el parámetro Fuerza de Blanco reducido, $TS'_{bs} = 20 \log(F/2a)$, donde $F = f_\infty(\theta_{inc}, \varphi_{inc}; \theta_s = \pi - \theta_{inc}, \varphi_s = \pi)$, para dos valores de $k_0 a$. Al aumentar dicho parámetro el número de lóbulos también aumenta. El caso de esferoide prolado blando presenta lóbulos mucho menos prominentes que el caso rígido. Se observa que al variar el ángulo de incidencia, la diferencia entre los valores de TS'_{bs} máximos y mínimos puede variar entre 15dB y 30dB para el caso de esferoide blando, o entre 10dB y 60dB para el caso de esferoide rígido, siendo mayor la diferencia para valores mayores de $k_0 a$.

Esto indica que el valor TS'_{bs} es fuertemente dependiente del ángulo de incidencia y de la relación de tamaño del dispersor de volumen, relativo a la longitud de onda.

En términos de las coordenadas esferoidales proladas, la condición $a \approx b$ equivale a $\xi_0 \gg 1$ (considerando que $\xi_0 = [1 - (b/a)^2]^{-1/2}$). Con esta aproximación se calcularon los parámetros TS_{bs} para distintos valores del semieje mayor, considerando dos condiciones de contorno típicas: esferas rígida y blanda. En ambos casos el TS_{bs} modelado coincide con el valor analítico calculado por Urick⁽⁷⁾, como se ilustra en la Figura 3, para la esfera blanda. En los ejemplos representados se observa la independencia con el ángulo de incidencia y además, cuando $k_0 a > 10$, los valores de TS_{bs} modelados convergen a los valores dados por la dispersión geométrica.

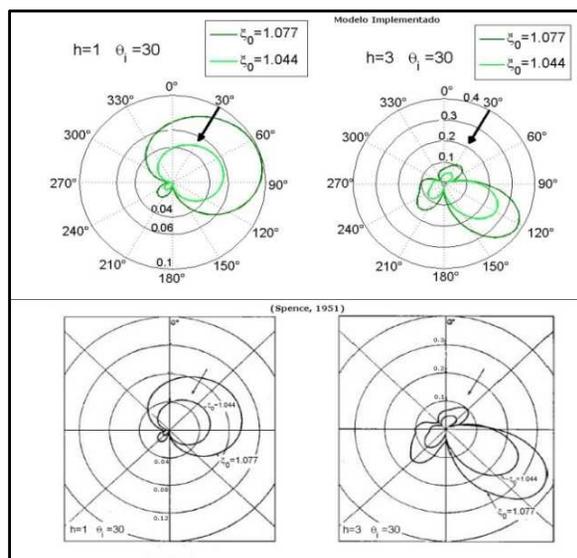


Figura 4: Función de dispersión (30° de incidencia), 2 esferoides prolados y 2 relaciones entre tamaño del esferoide y λ . Comparación: modelo (arriba) y resultados de Spence⁽²⁾ (abajo).

La concordancia entre los resultados teóricos de Furusawa⁽¹⁾ y las simulaciones a partir del modelo implementado constituyen otra convalidación muy satisfactoria

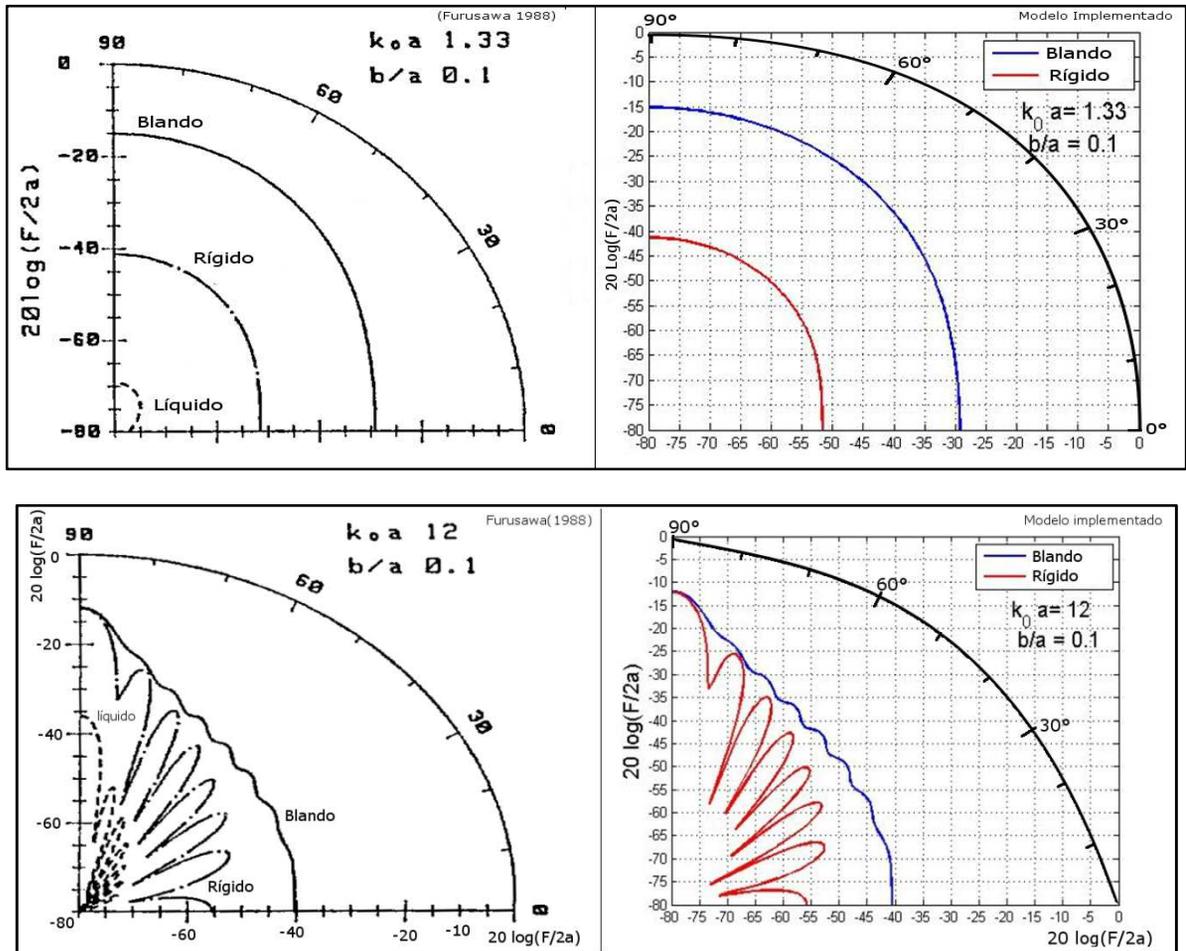


Figura 5: Comparación del parámetro TS_{bs} de retro-dispersión en función del ángulo de incidencia para dos valores determinados de k_0a . Der: resultados obtenidos con el modelo implementado para las condiciones de contorno rígida y blanda. Izq: resultados presentados en Furusawa⁽¹⁾ para tres tipos de condiciones de contorno.

Cabe mencionar que el modelo implementado permite obtener resultados para los distintos modos de dispersión posibles según el parámetro k_0a , tales como la retro-dispersión principal, la difracción en el contorno o la producida alrededor del contorno⁽⁹⁾, ⁽¹⁴⁾ (denominadas Ondas de Franz). Estas últimas generan máximos y mínimos relativos de TS_{bs} dependientes de las dimensiones características del esferoide prolado, y pueden provocar variaciones significativas de TS para pequeñas variaciones de k_0a , especialmente si la onda incidente se propaga en la dirección del eje mayor del esferoide.

IV. MEDICIONES DE RETRODISPERSIÓN EN PERCAS (*Percichthys trucha*)

La configuración experimental utilizada para medir el parámetro Fuerza de Blanco de Retro-Dispersión (*Backscattering Target Strength*), TS_{bs} , debido a la respuesta acústica de ejemplares de una especie de la fauna ictícola autóctona argentina (*Percichthys trucha*), usando una ecosonda de haz dividido (SIMRAD EY500)⁽¹⁵⁾ y operando a 38 kHz, se puede observar en la Figura 6.

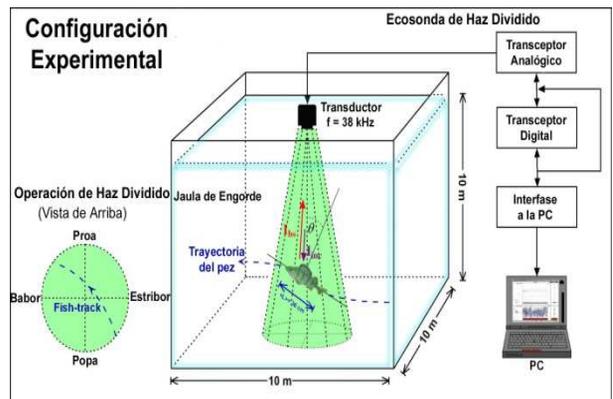


Figura 6: Configuración experimental usada para las mediciones de TS_{bs} en jaulas de engorde de peces, sobre ejemplares de *Percichthys trucha*, a 38 kHz.

Para lograr un número elevado de mediciones de ecos individuales, se colocaron 23 ejemplares en una jaula para engorde de peces, de forma cúbica, de 10 m de lado, construida con paneles de red. El número de ejemplares escogidos es el resultado de una relación de

compromiso entre, la necesidad de mantener por un lado una densidad de blancos suficientemente baja dentro de la jaula, asegurando así una alta probabilidad de que los ecos correspondan a individuos aislados y por el otro, suficientemente alto como para asegurar una cantidad elevada de pasajes de los peces a través del haz del transductor.

Los peces fueron previamente capturados en las inmediaciones del emplazamiento del experimento y mantenidos con vida durante dos días en otra jaula similar, para permitir la aclimatación de sus vejigas gaseosas a la presión hidrostática de superficie y evitar así posibles distorsiones morfológicas (producto de la descompresión sufrida durante el proceso de captura de los mismos). Se excluyeron del experimento aquellos ejemplares que exhibieron comportamientos anómalos durante el periodo de aclimatación.

Dado que en el conjunto de mediciones resultante sería imposible identificar a cada ejemplar en particular, se escogieron peces de la misma especie y con poca variabilidad de tamaños, para asegurar la similitud de las respuestas acústicas individuales de cada uno dentro del conjunto.

Una vez concluido el experimento, los peces fueron sacrificados para su disección. Se midió el largo total del cuerpo y una vez expuesta mediante la disección, se midieron las dimensiones máximas de su vejiga gaseosa, en los planos longitudinal (largo) y transversal (ancho). En aquellos casos donde la vejiga sufrió daños durante la disección, sus dimensiones se estimaron por regresión lineal simple a partir de los demás datos del conjunto (ver Tabla I).

TABLA I. Mediciones de dimensiones y peso de los peces ensonificados y de sus vejigas natatorias.

Ejemplar	PEZ		VEJIGA	
	Largo total (cm)	Peso total (kg)	Largo vejiga (cm)	Díámetro vejiga (cm)
1	35.5	0.51	10.5	4.0
2	34.5	0.39	---	---
3	37.0	0.52	11.0	3.5
4	38.5	0.64	11.0	3.5
5	33.0	0.45	---	---
6	38.0	0.59	---	---
7	34.5	0.49	10.0	4.0
8	45.5	1.15	13.0	4.5
9	36.0	0.58	---	---
10	37.0	0.56	11.5	3.5
11	36.0	0.64	---	---
12	36.5	0.5	10.0	3.5
13	38.5	0.58	10.5	4.0
14	34.0	0.44	9.5	3.3
15	37.5	0.54	10.5	3.5
16	35.0	0.54	---	---
17	34.5	0.44	10.5	3.8
18	40.5	0.71	11.5	4.0
19	34.5	0.43	10.0	3.5
20	35.5	0.47	9.5	3.2
21	26.5	0.57	10.0	3.7
22	36.0	0.5	10.5	4.0
23	37.5	0.58	---	---

Durante el período de medición (aproximadamente 12 hs continuas) los ejemplares nadaron libremente dentro de la jaula mientras la ecosonda emitía pulsos (*pings*) ultrasónicos a intervalos regulares. Para maximizar el número de datos obtenidos, el intervalo de disparo de la ecosonda se programó en el valor máximo

posible (10 pulsos/s), mientras que la duración de los pulsos fue escogida en el valor mínimo posible para este equipo (0.3 ms), minimizando de esta forma el volumen de muestreo acústico y por consiguiente, la posibilidad de ocurrencia de ecos múltiples provenientes de grupos de peces.

El transductor electroacústico utilizado es un arreglo de elementos resonantes múltiples, con una apertura angular del haz de 12 grados (a media potencia), dispuesto en forma de dos pares de hemisferios radiantes, ortogonales entre sí (*split beam*)⁽¹⁵⁾. Esta disposición de elementos permite medir, además, los dos ángulos de fase ortogonales correspondientes a cada par de hemisferios y obtener entonces la distancia al blanco y la posición del mismo dentro del volumen de ensonificación. Esta configuración, asimismo, permite corregir el efecto direccional causado por el patrón de directividad del transductor, obteniéndose así valores verdaderos de la amplitud ecoica de los dispersores de sonido (en este caso, los peces en la jaula de mediciones).

Para las determinaciones experimentales de TS_{bs} se usó la expresión matemática⁽¹⁵⁾:

$$TS_{bs} = \log \left(\frac{P_{rec} (4\pi r^2)^2 10^{2\alpha r}}{P_{trans} G^2 r_0^2 \lambda^2} \right), \quad (12)$$

donde P_{rec} y P_{trans} son, respectivamente, las potencias recibida y transmitida, en las terminales del transductor; r es la distancia transductor-pez; $r_0=1$ m; α es el coeficiente logarítmico de absorción de sonido, dependiente de la distancia⁽⁷⁾; λ es la longitud de onda acústica; y G es la ganancia del transductor, obtenida mediante la utilización de blancos acústicos estándar.

Las señales registradas con el transductor de haz dividido (*split beam*) se digitalizaron a tiempo real con una resolución vertical equivalente de 0.1m y se almacenaron en archivos de datos. Estos archivos fueron procesados con posterioridad mediante el programa para pos-procesamiento de datos acústicos EchoView Vers. 4.10⁽¹⁶⁾. En primer lugar se construyeron imágenes (ecoregistros) extrayendo de la señal sólo los ecos originados por peces aislados. Para ello se utilizaron diferentes criterios de filtrado de la señal, analizándose el tiempo de duración de los ecos cuyo valor máximo se fijó en 1.4 veces la duración del pulso transmitido (re. -8 dB del valor pico).

Como una medida adicional para asegurar la exclusión de ecos provenientes de grupos de peces en nuestro *set* de datos, se construyeron trayectorias de peces (*fish-tracks*) a partir de secuencias de ecos consecutivos. La duración (número de ecos consecutivos) de cada una de estas trayectorias, depende del tiempo de permanencia del pez dentro del haz de sonido. Se excluyeron aquellas trayectorias que generaron menos de cuatro ecos consecutivos, así como todas aquellas que se encontraban muy próximas entre sí. Cabe destacar que las trayectorias (y los ecos individuales que las conforman) pueden corresponder a cualquiera de los 23 especímenes presentes en la jaula de mediciones, no existiendo una manera fehaciente de identificar a cualquiera de los individuos en particular.

De esta forma, se asume que los datos resultantes corresponden exclusivamente a ecos de individuos aislados que nadaban dentro del haz de sonido emitido por el transductor, produciendo los correspondientes valores de TS_{bs} . Así se obtuvieron, finalmente, unos 10.000 valores de ecos individuales, es decir, valores de TS_{bs} , agrupados en 300 trayectorias de peces. Estas trayectorias individuales consisten en secuencias de hasta 400 ecos individuales consecutivos en algunos casos.

Para cada una de estas trayectorias se realizó el análisis estadístico correspondiente. Se utilizó el valor medio de la Fuerza de Blanco ($\overline{TS_{bs}}$) como parámetro para comparar los datos experimentales con los resultados que se obtienen mediante la simulación del experimento utilizando el modelo implementado (ver Sección III). En la Sección V se presenta dicha comparación.

V. APLICACIONES: COMPARACIÓN ENTRE DATOS SIMULADOS Y EXPERIMENTALES

Como se menciona en la Sección I, se compararon resultados experimentales de TS de peces con resultados obtenidos mediante la simulación con el modelo implementado (ver Sección III).

En particular, se simularon dos condiciones experimentales diferentes para comparar los resultados con los datos experimentales correspondientes:

1. Experimento descrito en la Sección IV con 23 ejemplares de percas (*Percichthys trucha*). Se comparan los resultados de $\overline{TS_b}$ experimentales presentados en este trabajo con los simulados.
2. Dependencia de los valores máximos del parámetro TS_{bs} con la longitud del pez para determinada especie de bacalao (*Gadus morhua*). Se compararon, respectivamente, los ajustes lineales obtenidos a partir de datos simulados y de datos medidos reportados⁽⁶⁾.

En ambos casos el modelo implementado se utilizó para calcular el TS_{bs} (a 38 kHz) de esferoides prolados con condiciones de contorno blandas cuyas dimensiones características (semiejes mayor y menor) coinciden con las dimensiones características de las vejigas natatorias de los ejemplares involucrados en las mediciones experimentales respectivas. Se asume que la vejiga natatoria contribuye con un 80% a 90% a la sección eficaz de retro-dispersión acústica de todo el pez⁽⁶⁾, a los efectos de calcular el TS_{bs} del mismo. Se describen a continuación las condiciones utilizadas para cada simulación y se presentan los resultados.

1. Experimento simulado para percas (*Percichthys trucha*).

Para simular las condiciones experimentales descritas en la Sección IV, se utilizaron las dimensiones características de las vejigas natatorias de los 23 ejemplares de percas (indicados en la TABLA I), determinando mediante regresión lineal las dimensiones de aquellas vejigas natatorias que no pudieron medirse.

Se simularon 300 trayectorias de peces atravesando el haz de sonido del transductor. Cada trayectoria corresponde al pasaje de alguno de los 23 ejemplares indicados en la TABLA I, seleccionados de manera equiprobable a los efectos de la simulación (determinando las dimensiones características del esferoide prolado que representa al ejemplar seleccionado para esa trayectoria, a_t y b_t).

Para cada trayectoria simulada se considera un ángulo principal θ_t respecto al eje acústico del haz, determinado mediante selección aleatoria siguiendo una distribución Gaussiana (centrada en $\mu_0 = 97^\circ$ acorde al ángulo típico que presenta el eje longitudinal de la vejiga natatoria en especies similares de peces⁽¹⁷⁾). Para simular además pequeñas variaciones angulares en cada una de las trayectorias (producidas por los movimientos del pez al nadar) se considera además una variación ϵ_{t1} (con distribución Gaussiana centrada en 0°) alrededor de θ_t .

Con estas consideraciones se obtiene el $\overline{TS_b}$ simulado para cada una de las 300 trayectorias mediante la siguiente ecuación,

$$\overline{TS_{bs}}_{sim} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N TS_{bs}(\theta_t + \epsilon_{t1}, a_t, b_t, \lambda) \quad (13)$$

donde N es la cantidad de ecos producidos en una dada trayectoria (N = 100, valor representativo de la cantidad de los ecos que se miden experimentalmente para una misma trayectoria) y el TS_{bs} se calcula mediante las ecs. (9) y (11) utilizando el modelo implementado.

En la Figura 7 se presentan el histograma de valores de TS_{bs} medidos (según se describió en la Sección IV) y el obtenido con los datos simulados. En ambos casos corresponden a 300 trayectorias de percas. Se presentan también los valores medios teóricos y experimentales, respectivamente (ver recuadro a izq. en la Figura 7), considerando el total de ecos mostrados, mostrando una diferencia del 3%. Los histogramas presentan una envolvente similar, aunque la distribución de datos simulados se sesga 2 dB a la izquierda de la experimental.

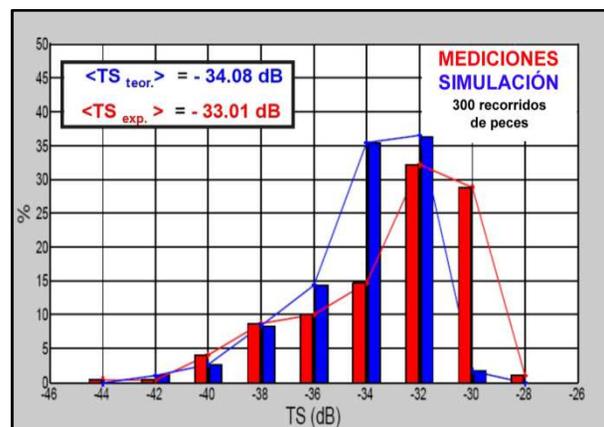


Figura 7: Histogramas de TS para el caso de retro-dispersión, TS_{bs} a 38 kHz. — Mediciones sobre ejemplares de *Percichthys trucha*; — Simulaciones del experimento con el modelo implementado.

2. Experimento simulado con datos reportados⁽⁶⁾ para bacalao (*Gadus morhua*).

Existen abundantes referencias en las que se reportan curvas empíricas de regresión para estimar TS_{bs} en función de las dimensiones de los peces (especialmente, de su longitud)^{(6), (18), (19), (20)}. En un trabajo de Foote⁽⁶⁾ con ejemplares de bacalao (*Gadus morhua*), se reportan mediciones acústicas de valores máximos de TS_{bs} , (TS_{bs}^{MAX} , predominantemente relacionados con una presentación dorsal del pez respecto al eje acústico del haz sonoro), y sus respectivas longitudes, comprendidas en un rango de 29 cm - 42 cm. La regresión lineal usada para el ajuste de sus datos es

$$TS_{bs}^{MAX}|_{dB} = 27 \log(L) - 72 \quad (14)$$

Con el modelo implementado se simularon datos de TS_{bs}^{MAX} , para 38 kHz; para un ángulo entre el semieje mayor de la vejiga y el vector de onda incidente de 90°; y para dimensiones de los semiejes a y b del esferoide prolado, compatibles con longitudes L en el rango de las medidas. Para ello se simularon 130 valores de TS_{bs}^{MAX} para el rango 29 cm - 42 cm en pasos de 0.1 cm. Para simular la variabilidad natural de dimensiones de vejigas natatorias en peces de igual talla, se utilizaron pares a_j, b_j ($j=1, \dots, 130$) generados suponiendo un factor de proporcionalidad gaussiano del tipo

$$a_j = \alpha_j L_j \quad y \quad b_j = \beta_j L_j$$

donde α_j, β_j son realizaciones de variables aleatorias con distribución normal. Los valores calculados para la media y la desviación estándar correspondientes fueron $\alpha_i \sim N(0.4, 0.15^2)$ y $\beta_i \sim N(0.05, 0.02^2)$.

En la Figura 8 se muestra la curva de regresión lineal obtenida por Foote⁽⁶⁾ para sus datos experimentales de TS_{bs}^{MAX} , producidos por ejemplares de *Gadus morhua*, los datos simulados con el modelo y la regresión lineal de los mismos.

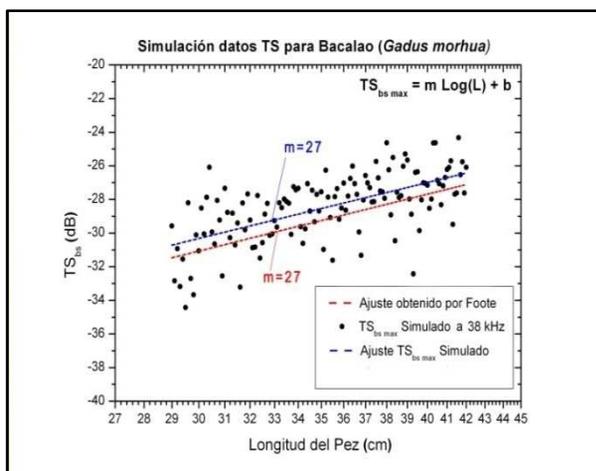


Figura 8: Comparación entre curvas empíricas de regresión lineal sobre datos experimentales en ejemplares de *Gadus morhua*⁽⁶⁾ y datos simulados.

La comparación de ambas regresiones, experimental y simulada, resultó muy satisfactoria, hallándose el mismo valor de pendiente, 27 dB/cm, con un error porcentual del 11% y del 22%, para los datos simulados y experimentales, respectivamente. Las ordenadas al origen de sendas rectas difieren en 2 dB, habiéndose determinado con un error porcentual del 7% para los datos simulados y del 12% para los experimentales.

VI. CONCLUSIONES

Los resultados del presente trabajo refuerzan la idea antes enunciada por algunos autores⁽¹⁾ sobre la utilidad de describir geométricamente a los peces como esferoides prolados cuando se quiere modelar su respuesta acústica.

Se ha implementado un código en lenguaje tipo MATLAB que permite disponer de una herramienta computacional robusta para calcular la dispersión acústica producida por esferoides prolados de dimensiones variables sobre los que incidan ondas acústicas planas y armónicas, para los casos de dispersores blandos (aplicable en primera aproximación a la vejiga natatoria de un pez) y rígidos (útil para un vehículo submarino).

Se validó el modelo implementado con resultados teóricos conocidos, documentados en publicaciones de referencia, obteniéndose resultados altamente satisfactorios.

Se verificó que con el modelo implementado se logran simular resultados experimentales de mediciones propias y de mediciones reportadas en la literatura.

Los resultados obtenidos hasta el presente sugieren la continuación de las investigaciones en el tema, tendientes a la próxima implementación de un modelo equivalente que incluya el caso de dispersor líquido (aplicable al cuerpo de los peces); a análisis sobre efectos de la variabilidad de la orientación de los peces durante sus desplazamientos; estudio de los rangos de validez del modelo en lo referente a la frecuencia (o lo que es equivalente, relación entre la longitud de onda y las dimensiones del dispersor); futuros análisis de sensibilidad de las predicciones del modelo frente a variaciones de las dimensiones del volumen dispersor relativas a la longitud de onda acústica y a variables ambientales tales como la velocidad de sonido.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr Ricardo Depine por haber facilitado cierta bibliografía. Asimismo, expresan su reconocimiento al Lic. Edmundo Lavia por sus sugerencias sobre la redacción del artículo y su colaboración en la parte gráfica junto al Ing. Hernán Isbert Perlender.

Referencias

- 1- Furusawa, M. J. Acoust. Soc. Jpn., **9** (1), 13-24 (1988).
- 2- Spence, R.D. y Granger, S. J. Acoust. Soc. Am., **23** (6),

701-706 (1951).

- 3- Silbiger, A. J. *Acoust. Soc. Am.*, **35** (4), 564-570 (1963).
- 4- Abramowitz, M. y Stegun, I. A. in "Handbook of Mathematical Functions". Dover Publications Inc., New York, 9ª Edición, 751-769 (1970).
- 5- Thompson, W. J. in "Computing in Science & Engineering". Ed. Sullivan F. y Thompson W. J. 84-87 (1999).
- 6- Foote, K. G. J. *Acoust. Soc. Am.*, **67**, (6), 2084-2089 (1980).
- 7- Urick, R. in "Principles of underwater sound for engineers". Ed. Wiley & Sons, New York, 384 pp. (1975).
- 8- Clay, C. S. and Medwin H. in "Acoustical Oceanography: Principles and Applications". Ed. John Wiley and Sons, Inc., pp 544 (1977).
- 9- Medwin, H., y C. Clay in "Fundamentals of Acoustic Oceanography". Academic Press, pp. 712. 1998.
- 10- Lauchle, G. C. J. *Acoust. Soc. Am.*, **58**, 568-575 (1975).
- 11- Shanle Z. y Jiamming J., in "Computation of Special Functions". Ed. Wiley. (1996).
- 12- Le-Wei Li, Mook-Seng Leong, Tat-Soon Yeo, Pang-Shyan Kooi y Kian-Yong Tan. *Physical Rev.*, 6792- 6805 (1998).
- 13- Flammer, C. in "Spheroidal Wave Functions". Stanford University Press, Stanford, CA (1957).
- 14- Clay, C. S. J. *Acoust. Soc. Am.*, **89** (5), 2168-79 (1991).
- 15- Instruction Manual SIMRAD EY500. Pp 262.
- 16- Manual de: SonarData. Tasmania, Australia: SonarData Pty; 2005. Echoview Version 4.10.67. <http://support.echoview.com/WebHelp/Echoview.htm>
- 17- Foote, K. G. J. *Acoust. Soc. Am.*, **67** (2), 504-515 (1980).
- 18- Foote, K. G., Aglen, A. y Nakken O. *J. Acoust. Soc. Am.* **80** (2), 612-621 (1986).
- 19- Love, R. H. *Fishery Bulletin*, **69** (4) , 703-715 (1971).
- 20- McClatchie, S., Alsop, J. y Coombs R. F. *ICES Journal of Marine Sciences*, **53**, 780-791(1996).

$$R_{mn}^{(i)} = l_{mn}^{(i)} S_{mn}^{(i)} \quad (A.3)$$

La determinación de los coeficientes $d_k^{mn}(h)$ es un problema de autovalores y autovectores cuya resolución involucra la diagonalización de una matriz tridiagonal ^{(11), (12)}.

APÉNDICE

El cálculo de las funciones esféricas se efectivizó, esencialmente, a partir de su desarrollo como combinaciones lineales de otras familias de funciones conocidas, a saber,

$$S_{mn}^{(1)}(h, \eta) = \sum_{k=0,1}^{\infty} ' d_k^{mn}(h) P_{m+k}^m(\eta) \quad (A.1)$$

$$S_{mn}^{(2)}(h, \eta) = \sum_{k=0,1}^{\infty} ' d_k^{mn}(h) Q_{m+k}^m(\eta) \quad (A.2)$$

donde $S_{mn}^{(i)}$, $R_{mn}^{(i)}$ son las funciones angulares y radiales de tipo "i", con $i= 1, \dots, 4$; y $l_{mn}^{(i)}$ es un conector dependiente de la frecuencia, la distancia interfocal y los índices m y n ⁽¹²⁾. P_{m+k}^m y Q_{m+k}^m son los polinomios asociados de Legendre. El símbolo \sum' indica que la suma es tomada sobre los índices k que tienen la misma paridad que $m - n$.

Las funciones de onda esféricas proladas angulares, $S_{mn}(h, \eta)$, se relacionan con las radiales, $R_{mn}(h, \xi)$, a través de la expresión ^{(12), (13)}