Ruido subacuático: fundamentos, fuentes, cálculo y umbrales de contaminación ambiental

Underwater Noise: Fundamentals, Sources, Assessments and Acoustic Contamination Thresholds

Lázaro Redondo[1*], Antonio Ruiz Mateo[2]

Resumen

En este artículo se aborda la propagación del ruido en el mar y su afección a los animales marinos, mediante cuatro epígrafes: Fundamentos de la acústica submarina, fuentes del ruido, modelo de propagación y umbrales.

En el primer apartado se exponen algunos conceptos de la acústica subacuática, como la velocidad del sonido, las métricas habituales y la propagación del sonido en el agua. Después se han descrito las fuentes de ruido marino. A continuación se ha realizado un ejercicio de cálculo de las pérdidas por transmisión mediante el software ACTUP, utilizando los modelos RAMGeo y BELLHOP. Se finaliza con los umbrales por daños auditivos para distintos tipos de fauna marina.

Palabras clave: Ruido subacuático, Propagación del ruido, Umbrales sonoros, Contaminación acústica.

Abstract

This article deals with the propagation of noise at sea and its impact on marine animals under four headings: underwater acoustic fundamentals, noise sources, propagation model and thresholds.

In the first section some concepts of acoustic underwater are presented, such as the speed of sound, the usual metrics, and the propagation of sound in the water. Then, the sources of marine noise are described. Afterwards, an exercise is carried out in order to calculate the transmission losses in the ACTUP propagation model. Finally, it shows the thresholds for different types of marine fauna.

Keywords: *Underwater Noise, Acoustic Propagation, Noise Thresholds, Acoustic Contamination.*

1. INTRODUCCIÓN

Los conceptos de sonido, señal y ruido son diferentes: "el ruido y el sonido no son términos sinónimos. El sonido es un término que abarca y se refiere a cualquier energía acústica. El ruido es un subconjunto de sonido no deseado por la entidad que lo oye. Por lo tanto, cualquier sonido específico puede ser una señal para algunos y un ruido para los demás" (ACAIMM 2006).

La mayoría de las publicaciones existentes en la literatura científica sobre propagación del sonido submarino están orientadas a la detección de señales y no a los estudios de ruido como afección a la fauna marina, que es lo requerido en los estudios de impacto ambiental (EsIA).

Se han resumido los conceptos más relevantes sobre el sonido subacuático, como la velocidad, las métricas, la propagación y las pérdidas por transmisión, utilizando únicamente los logaritmos, con el objetivo de calcular la zona de afectada y cuantificar el impacto ambiental provocado por el ruido. Para ello se han descrito las fuentes de ruido marino y se han recopilado los umbrales auditivos utilizados en diversos países para el cálculo de la zona de exclusión.

2. FUNDAMENTOS DE LA ACÚSTICA SUBMARINA

El sonido es la propagación de cualquier perturbación mecánica, en forma de ondas, de una oscilación en la presión, a través de un fluido u otro medio elástico que esté generando el movimiento vibratorio de un cuerpo. La propagación del sonido involucra transporte de energía sin transporte de materia, en forma de ondas mecánicas que se propagan a través de la materia sólida, líquida o gaseosa.

2.1. Velocidad del sonido en el mar

La velocidad del sonido (c) en el mar suele estar comprendida entre 1450 y 1540 m/s. La velocidad del sonido puede medirse directamente, pero es habitual su cálculo mediante fórmulas empíricas en función de la temperatura T *(°C)*, la salinidad S *(g/kg)* y la presión, que es proporcional a la profundidad z *(m)*, variables que se pueden medir con facilidad mediante equipos de uso muy frecuente en oceanografía.

El cálculo de la velocidad del sonido en el mar en los estudios de impacto ambiental (EsIA) se puede realizar con la siguiente expresión, propuesta por Medwin (1975):

* Autor de contacto: lazaro.redondo@cedex.es

[1] Dr. Ingeniero naval. Coordinador de programa técnico científico. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA/CEDEX), C/ Alfonso XII, 3, 28014 (Madrid).

[2] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Exdirector de Proyectos Especiales del CEDEX.

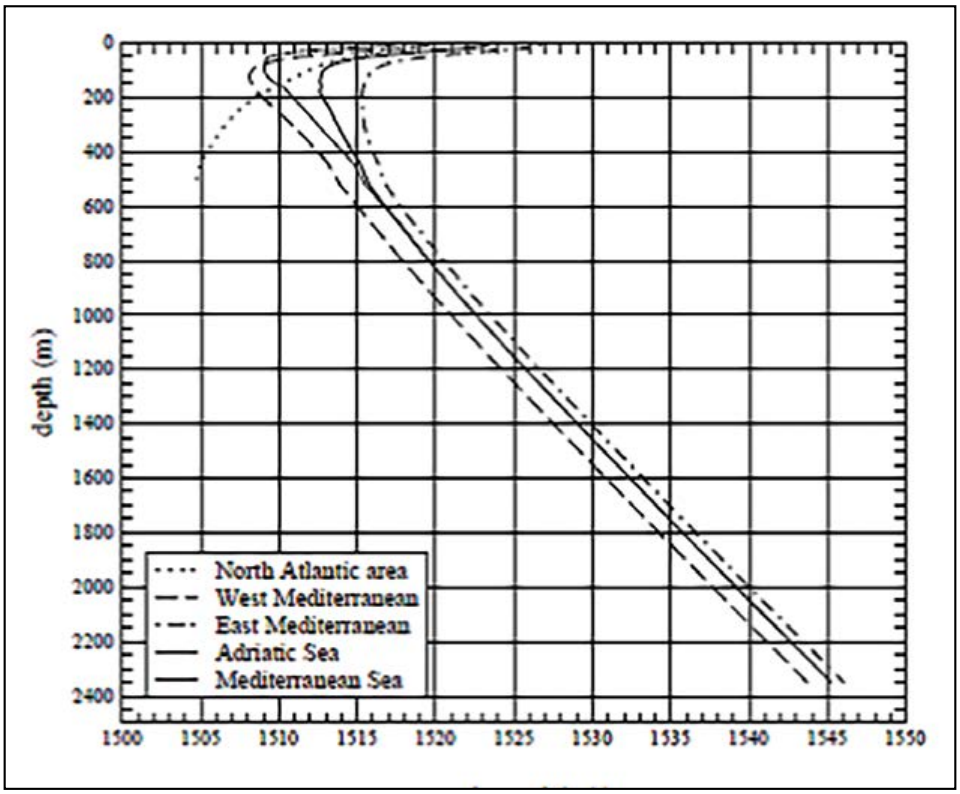

Figura 1. Perfiles verticales de velocidad del sonido, promediados espacialmente, para diversas zonas del Mediterráneo y para el Golfo de Cádiz (North Atlantic Area). Fuente: Salon et al, 2003.

$$c = 1449{,}2 + 4{,}6T - 0{,}055T^2 + 0{,}00029T^3 + \\ + (1{,}34 - 0{,}010T)(S - 35{,}0) + 0{,}016z$$

El valor de c se obtiene en m/s. Esta ecuación es válida para los siguientes rangos de temperatura, salinidad y profundidad.

$$0 \leq T \leq 35°C\,; \quad 0 \leq S \leq 45\ g/kg; \quad 0 \leq z \leq 1000\ m$$

La velocidad del sonido se incrementa al aumentar cualquiera de estas tres variables. De acuerdo con la fórmula anterior, aumenta alrededor de 1,2 m/s por cada g/kg de incremento de salinidad, y alrededor de 1,6 m/s por cada 100 m de aumento de profundidad. El incremento por cada °C de aumento de temperatura depende bastante de la temperatura de partida, variando entre 4,1 m/s para una temperatura inicial de 5 °C y 2,1 m/s para una temperatura inicial de 30 °C.

El agua de mar suele presentar estratificación de densidad, es decir, los gradientes horizontales de densidad son miles de veces más pequeños que los gradientes verticales. A su vez, la densidad está determinada por la salinidad y la temperatura de forma que distintas combinaciones de estas dos variables pueden dar lugar a la misma densidad.

En consecuencia, la estratificación de densidad no implica necesariamente una estratificación de salinidades y de temperaturas. No obstante, también estas variables suelen presentar gradientes horizontales muy pequeños (salvo en las desembocaduras de ríos y estuarios, en zonas afectadas por deshielos o por lluvias recientes o en las márgenes de las grandes corrientes oceánicas). Por lo tanto, en una primera aproximación puede suponerse que la velocidad del sonido es también una variable que presenta estratificación horizontal y que varía solo en sentido vertical.

En la figura 1 se representan unos perfiles verticales de velocidad del sonido para profundidades comprendidas entre 5 y 2350 m promediados espacialmente para diversas zonas del Mediterráneo y para el golfo de Cádiz.

Puede apreciarse cómo en la superficie existe una gran variabilidad, que va decreciendo hasta anularse a una determinada profundidad. Esta variabilidad se debe fundamentalmente a las oscilaciones diarias y estacionales de temperatura en la atmósfera, que se van propagando hacia capas de mayor profundidad de una forma cada vez más atenuada. A partir de una cierta profundidad las condiciones de salinidad y temperatura son muy estables y, por lo tanto, la velocidad del sonido solo varía debido al incremento de profundidad, por lo que el gradiente de variación es constante.

2.2. Métricas

Existen diferentes métricas para expresar el nivel de una onda acústica, cada una de las cuales es más o menos adecuada a cada tipo de señal o tipo de efecto sobre los diferentes grupos de especies de fauna. La señal puede ser impulsiva, continua o intermitente.

Los tipos de efectos se pueden ordenar de mayor a menor gravedad como mortalidad, daño auditivo permanente o temporal, confusión en la percepción de los sonidos (discriminación de intensidad, frecuencia, dirección o distancia), cambios de comportamiento (huida, modificación de las trayectorias), enmascaramiento de señales de socialización o de ecolocalización.

Los grupos de especies se pueden catalogar como cetáceos (rangos auditivos de altas, medias o bajas frecuencias), pinnípedos, tortugas y peces (con vejiga natatoria o planos).

Actualmente no existen conclusiones definitivas sobre la métrica más adecuada para expresar cada tipo de efecto sobre cada grupo de especies, y menos aún sobre los umbrales de ruido correspondientes.

2.2.1. El Decibelio

En Acústica, se manejan variables cuyos rangos de valores se extienden sobre varios órdenes de magnitud. Por ejemplo, la presión acústica producida por el disparo de un cañón de aire en sus proximidades es del orden de 1 MPa mientras que los valores más pequeños que tienen alguna significación son del orden de 1 µPa. El rango de valores de las presiones se extiende por lo tanto sobre 12 órdenes de magnitud.

Para trabajar con estas variables se utilizan escalas logarítmicas, concretamente, logaritmos en base 10. Esto convierte cada factor 10 (un orden de magnitud) en un sumando unidad, lo que permite manejar números más sencillos. Así, la relación entre 1 MPa y 1 µPa se convierte en:

$$log\frac{1\ MPa}{1\ \mu Pa} = log(10^{12}) = 12\ (re\ 1\ \mu Pa)$$

Este mismo sistema puede utilizarse para expresar valores absolutos de una magnitud si se divide por un valor de referencia expresado en las mismas unidades:

$$log\frac{X}{X_{ref}}$$

A la expresión de la cantidad X mediante el resultado de este cálculo se la denomina *nivel de X* ó "X Level" *(XL)*.

Aunque este cociente es adimensional y por lo tanto, también lo es su logaritmo, se ha adoptado el convenio de denominar *belio (B)* a las unidades que resultan de realizar dicho cálculo. Por lo tanto, un belio de una magnitud cualquiera es una cantidad X de ésta igual a 10 veces la cantidad X_{ref} de referencia.

El umbral de detección de un incremento de nivel acústico es aproximadamente la décima parte del logaritmo decimal del factor por el que se multiplica la intensidad. Por ello se ha universalizado el empleo del *decibelio (dB)* como unidad de medida del nivel de una magnitud:

$$XL(dB) = 10\ log\frac{X}{X_{ref}}$$

El nivel de presión sonora (SPL) es una excepción importante que se verá en el apartado 2.2.5.

2.2.2. Raíz Cuadrática Media (Root Mean Square, *RMS)*

El valor RMS de la presión se calcula como la raíz cuadrada de la media de los valores de presión de la onda al cuadrado, con la siguiente fórmula:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T |p(t)|^2 dt}$$

Donde, T es la duración de la señal y $p(t)$ son los valores de presión de la misma.

Se utiliza para cuantificar el ruido de naturaleza continua. Ejemplos de fuentes sonoras submarinas de naturaleza continua son el tráfico marítimo o el ruido ambiente marino.

2.2.3. Niveles de pico

El valor de pico o cero a pico ($p_{0\text{-}p}$) de la presión es el valor máximo instantáneo que puede ser recogido en un intervalo de tiempo determinado. El valor pico a pico ($p_{p\text{-}p}$) es la diferencia entre los valores máximo y mínimo instantáneos registrados en dicho intervalo de tiempo. Los niveles correspondientes se calculan mediante las expresiones:

Nivel de pico (o cero a pico): $N_{0-p} = p_{0-p}L = 20\ log\frac{p_{0-p}}{p_{ref}}$

Nivel pico a pico: $N_{p-p} = p_{p-p}L = 20\ log\frac{p_{p-p}}{p_{ref}}$

Los niveles de pico muestran si una señal puede producir un daño fisiológico debido a una presión muy alta, aunque sea instantánea.

2.2.4. Nivel de Exposición Sonora (Sound Exposure Level, *SEL)*

La energía de una señal acústica durante un tiempo determinado T es proporcional a la integral respecto al tiempo del cuadrado de la presión, por lo que depende tanto de su amplitud como de su duración. El SEL es la expresión en decibelios de dicha energía tomando como referencia la de una señal de presión constante p_{ref}, igual a 1 µPa en acústica submarina, actuando durante un segundo:

$$SEL(dB) = 10\log\frac{E}{E_{ref}} = 10\ log\frac{\int_0^T p^2 dt}{p_{ref}^2 \cdot 1s}$$

El cociente del último miembro es adimensional, coincide numéricamente con el valor de la integral $\int_0^T p^2 dt$ si se expresa la presión en µPa y el tiempo en s.

El SEL se puede utilizar para comparar sucesos sonoros de distintas presiones máximas y duraciones.

2.2.5. Nivel de presión sonora (Sound Pressure Level, *SPL)*

La impresión de nivel acústico del oído humano viene determinada por la intensidad (densidad de flujo de energía). Como en la mayoría de los casos de interés práctico ésta es proporcional al cuadrado de la presión ($I=p^2/z$, siendo z la impedancia del medio de transmisión), el nivel de presión sonora en decibelios se define como:

$$SPL(dB) = 10\ log\frac{p^2}{p_{ref}^2} = 20\ log\frac{p}{p_{ref}}$$

Para una onda senoidal de presión cuya amplitud sea p_{max}, la expresión en dB del valor de pico es la siguiente:

$$p_{0-p}L(dB) = 20\ log\frac{p_{max}}{p_{ref}}$$

La intensidad media es:

$$\bar{I}L(dB) = 10\ log\frac{\bar{I}}{I_{ref}} = 10\ log\frac{p_{RMS}^2}{p_{ref}^2} = 20\ log\frac{p_{RMS}}{p_{ref}} =$$

$$= p_{RMS}L(dB) =$$

$$20\ log\frac{p_{max}/\sqrt{2}}{p_{ref}} = p_{0-p}L(dB) - 20\ log\sqrt{2} =$$

$$= p_{0-p}L(dB) - 3dB$$

Los valores de referencia para la expresión en dB de las diferentes magnitudes acústicas son combinaciones de las unidades del Sistema Internacional de Unidades (metro, segundo, julio, watio), a excepción de la presión, para la que se utiliza como referencia un submúltiplo de la unidad: el micropascal (μPa). El μPa se utiliza también en todas las combinaciones de valores de referencia en las que intervenga la presión.

Los valores de referencia de la presión, intensidad y potencia son diferentes para el aire que para el mar. El valor de referencia de la **presión sonora eficaz** (RMS) en el aire, para el cálculo en dB es $p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}$Pa (20 μPa). Este valor es aproximadamente el umbral de audición humana a 1 kHz. Las unidades resultantes son dB de presión sonora referidos a 20 μPa:

$$SPL = 10 \cdot log\,(p_{rms}^2/p_{ref}^2)\ dB \text{ re } 20\mu Pa$$

En el mar, para la presión sonora se utiliza la referencia de 1 μPa, y los niveles de presión sonora se miden en dB *re* 1μ Pa. Al pasar del aire al mar, el cambio de presión de referencia de 20 μPa a 1 μPa corresponde a 26 dB ($20 \cdot \log 20 \approx 26\ dB$).

Con la **intensidad sonora**, ***IL*** (Nivel de Intensidad), el valor de referencia es $I_0 = 1 pW/m^2 = 10^{-12}\ W/m^2$. Las unidades resultantes son dB de nivel de intensidad sonora:

$$IL = 10 \cdot \log(I/I_0)$$

Si se opera con **potencia acústica**, el valor de referencia es $W_0 = 10^{-12}$ W. Las unidades resultantes son dB de nivel de potencia acústica:

$$WL = 10 \cdot \log(W/W_0)$$

Por otro lado, dado que la impedancia del medio (z) es distinta en el mar ($1{,}5 \cdot 10^6$ Rayls) que en el aire (415 Rayls), y que la relación entre la intensidad y la presión en campo libre viene dada por la expresión $I=p^2/z$, una misma presión ejercida en el mar provoca una intensidad 36 dB mayor que en el aire ($10 \cdot \log(1{,}5 \cdot 10^6/415) \approx 36\ dB$). Por tanto, como consecuencia de los cambios en la presión de referencia y en la impedancia del medio, una presión *p* provocará una intensidad *I* (dB) en el aire y una intensidad *I* + 62 dB en el mar.

Resumiendo, hay dos razones principales por las que no se pueden transformar directamente los niveles sonoros en el mar y en el aire. La primera se debe a que las variaciones de la densidad y velocidad del sonido en cada medio provocan cambios en la transmisión de la presión acústica. Para corregir estos efectos hay que sumar 36 dB al nivel medido en aire. La segunda razón viene dada por los distintos niveles de referencia utilizados para calcular el nivel de las señales en agua (re. 1 μPa) y en aire (re. 20 μPa), que se traduce a 26 dB. Por tanto, para expresar un nivel medido en el aire a su equivalente matemático en el agua deben sumarse 62 dB. Sin embargo, el gran desconocimiento existente, sobre las adaptaciones de la fisiología acústica de la fauna marina para recibir el sonido, hace que lo más prudente sea no realizar extrapolaciones sobre los impactos que los mismos niveles de sonido podrían tener en mar y aire.

2.2.6. Las octavas y los tercios de octava

El espectro audible, también denominado campo tonal, se halla conformado por las audiofrecuencias, es decir, toda la gama de frecuencias que pueden ser percibidas por el oído humano.

El término de octava se toma de una escala musical. Se denomina *octava* al intervalo de frecuencias comprendido entre una frecuencia dada y el doble de ésta. La octava se puede dividir en intervalos más pequeños como la media octava o el tercio de octava, obtenidos dividiendo por 2 ó 3, respectivamente, el segmento que representa una octava en una escala logarítmica. Esto significa que media octava es el intervalo de frecuencias comprendido entre una frecuencia dada y otra calculada multiplicando la anterior por el factor $2^{1/2}$, y el tercio de octava, el comprendido entre la frecuencia dada y la calculada multiplicando ésta por $2^{1/3}$. El análisis en tercios de octava es frecuente porque se aproxima al procesado espectral del oído humano, por lo que es la mejor idea que se tiene del funcionamiento del oído de otros mamíferos.

En una escala logarítmica todas las octavas tienen la misma longitud. La relación entre los intervalos geométricos que corresponden a una octava y a un tercio de octava es $(\log 2)/(\log 2^{1/3})$, que es exactamente igual a 3, de ahí su nombre.

La posición de cualquiera de estos intervalos suele indicarse dando la frecuencia central (f_c) del intervalo en la escala logarítmica, lo que corresponde a la media geométrica entre sus frecuencias inicial (f_{ini}) y final (f_{fin}). Por lo tanto, las relaciones entre estas frecuencias para cada tipo de intervalo es la siguiente:

- Octava: $f_c = f_{ini} \cdot \sqrt{2} = f_{fin}/\sqrt{2}$
- Tercio de octava: $f_c = f_{ini} \cdot 2^{1/6} = f_{fin}/2^{1/6}$

La lista estándar de frecuencias centrales de los tercios de octava contiguos se obtiene partiendo de una frecuencia central de 1 kHz, dividiendo o multiplicando por el factor $2^{1/3}$ todas las veces que haga falta para abarcar el espectro completo de la señal y redondeando los valores resultantes. En la tabla 1 se da la distribución de frecuencias en bandas de octava normalizadas según la Norma UNE-20464-90 (CEI 651).

Tabla 1. Distribución de frecuencias en bandas de octava

Frecuencia inferior (Hz)	Frecuencia central (Hz)	Frecuencia superior (Hz)
22	31,5	44
44	63	88
88	125	177
177	250	355
355	500	710
710	1000	1420
1420	2000	2840
2840	4000	5680
5680	8000	11360

En el tratamiento de señales acústicas es bastante habitual hacer pasar la señal por un conjunto de filtros pasabanda

cuyas ventanas corresponden a tercios de octava contiguos de forma que abarquen entre todos el espectro completo de la señal, reconstruyendo a continuación las señales filtradas por cada uno de ellos. Naturalmente, la superposición (suma) de todas las señales filtradas reproduce de nuevo la señal original. Igualmente, la potencia equivalente media de la señal original es igual a la suma de las potencias equivalentes medias de las señales filtradas en cada tercio de octava. Por lo tanto, a partir de éstas, que suelen medirse y expresarse en forma de tabla o de gráfico, pueden calcularse mediante sumas las potencias correspondientes a diferentes octavas e incluso a la señal original completa, que se suele denominar *potencia de banda ancha.*

2.3. Propagación del sonido

La fuente de sonido, ya sea una ballena, un volcán submarino, un barco o un cañón de aire irradia una señal con un nivel de fuente (*SL*). La intensidad del sonido se reduce por pérdida de transmisión (*TL*) cuando el sonido se desplaza desde la fuente al receptor. Con la formulación más simple, la intensidad del sonido en el receptor (*RL*) es:

$$RL = SL\text{-}TL$$

Todos los términos están expresados en dB, las iniciales se toman de los términos en inglés: *RL* (*Received Level*) es el Nivel recibido, *SL* (*Source Level*) es el nivel emitido por la fuente y *TL* (*Transmission Loss*) es la pérdida por transmisión, esta se refiere a la atenuación de una señal acústica debido a la pérdida de intensidad cuando una señal se desplaza por un medio. La pérdida de intensidad depende, básicamente, de dos fenómenos, la absorción y la divergencia de energía.

Los rayos acústicos van perdiendo potencia poco a poco a lo largo de su camino debido a un conjunto de factores que globalmente se denominan absorción. El nivel de **absorción de la energía** acústica depende de la longitud de onda de la señal. Ondas de alta frecuencia, con muy pequeña longitud de onda, chocan con las moléculas de agua, las hacen vibrar y pierden energía que es absorbida por las moléculas en esta vibración. Cuanto menor sea la frecuencia, y por tanto más largas las ondas, tienden a no chocar sino "mecer" las moléculas de agua y, por tanto, reducen la pérdida de energía por absorción. La siguiente expresión proporciona las pérdidas por divergencia y absorción (MMO, 2015):

$$TL = N \cdot \log(R) - \alpha \cdot R$$

Siendo,

N, el coeficiente de atenuación, toma el valor de 20 para pérdida por transmisión esférica y 10 para cilíndrica.

α, el coeficiente de absorción del ruido en el agua, superficie y fondo (sedimentos) en $dB \cdot m^{-1}$. Una aproximación de α es $0.036 \cdot f^{1.5}$, donde f es la frecuencia en kHz (Richarson et al, 1995).

Aunque la pérdida de energía por absorción sea despreciable para las frecuencias bajas, todos los sonidos sufren una **pérdida por divergencia**. Esta pérdida se debe a que la energía que se concentraba en un punto de emisión, al expandirse, se reparte en un espacio mucho mayor y, por tanto, la intensidad en cada punto de recepción se reduce. Existen tres tipos de divergencia: plana, cilíndrica y esférica. En un medio homogéneo (mismas propiedades físicas en todos los puntos) e isotrópico (mismas propiedades de propagación en todas las direcciones), la propagación del sonido es **esférica**. Esto se asume en el mar para aguas profundas. Simplificando la fórmula anterior, la pérdida por transmisión responde a la siguiente ecuación:

$$TL_{esférica} = 20 \cdot log\left(\frac{R}{R_0}\right)$$

Siendo $R < R_1$
R la distancia desde la fuente al receptor,
R_1 la profundidad,
R_0 la referencia, normalmente 1 m.

El sonido en el mar sigue normalmente una **propagación esférica**, que implica que la intensidad disminuye 6 dB cada vez que se dobla la distancia desde la fuente emisora. Sin embargo, en medios no homogéneos como las aguas someras, la señal experimenta una **propagación cilíndrica**, dado que las ondas se ven reflejadas por la superficie y por el fondo marino. Ello implica que la pérdida de intensidad es de 3 dB cada vez que se dobla la distancia. En el caso de propagación cilíndrica las pérdidas por transmisión se calculan con la fórmula siguiente:

$$TL_{cilíndrica} = 20 \cdot logR_1 + 10 \cdot log\left(\frac{R}{R_0}\right)$$

Siendo $R > R_1$
R la distancia desde la fuente al receptor,
R_1 la profundidad,
R_0 la referencia, normalmente 1 m.

La batimetría y el tipo de sustrato del fondo influyen en la propagación del sonido. Por ejemplo, la arena refleja mejor el sonido que el fango, el limo o la grava. La formulación siguiente incluye estos parámetros:

$$TL = 15 \cdot \log(R) + 5 \cdot log\left(\frac{\eta \cdot H}{\pi \cdot Rref}\right)$$

Donde,
η es el gradiente de pérdida de reflexión (0,25 para arena),
H es la profundidad,
π= 3,14,
Rref = 1 m,
N=15 Coeficiente de atenuación (Dekeling *et al*, 2014).

2.3.1. Refracción continua. Canales sonoros en el mar

Si el medio no es homogéneo, la velocidad de avance de unos puntos del frente será mayor que la de otros y su forma general se irá modificando. Como consecuencia, los rayos acústicos cambian de dirección: si la variación de la velocidad del sonido es continua, se curvan, y si es brusca como en una picnoclina, en el fondo o en la superficie, se quiebran. A este fenómeno se le denomina *refracción*.

Como se ha comentado en el apartado 2.1, en el mar es usual que exista un gradiente vertical de las propiedades del agua y como consecuencia la velocidad del sonido también es función de la coordenada vertical *c(z)*.

Cuando un rayo acústico parte de una fuente en una dirección determinada, su azimut permanece constante, es decir, el rayo se mantiene siempre en el plano vertical determinado por dicha dirección y la vertical. A lo largo de este plano, en cualquier punto del rayo, si *c* es ligeramente mayor a un lado que al otro del rayo en las proximidades de dicho punto, la trayectoria se curva ligeramente hacia el lado de menor velocidad, a este efecto se le denomina refracción continua.

La posición y forma concretas del rayo están determinadas por el punto de emisión, el ángulo de ataque inicial y el gradiente de la velocidad del sonido. Si ésta crece monótonamente con la profundidad, los rayos se curvan hacia arriba (el ángulo de ataque decrece monótonamente) y recíprocamente, si decrece, se curvan hacia abajo. Como consecuencia, para ángulos de ataque iniciales pequeños, los rayos no tocarán el fondo (*c* creciente) o la superficie (*c* decreciente). Si el perfil de velocidades decrece hasta una cierta profundidad y a partir de ella crece, los rayos que se inician cerca de la profundidad donde c es mínima con ángulos de ataque pequeños no tocarán ni el fondo ni la superficie.

En los contactos con el fondo se pierde bastante energía y por ello, los rayos que no contactan con el fondo son capaces de alcanzar distancias muy grandes, de centenares o incluso miles de kilómetros, sobre todo con ondas de baja frecuencia para las que la atenuación por absorción en el agua es muy pequeña. A las capas de agua que por su perfil de velocidades son capaces de conducir rayos acústicos sin tocar el fondo se les denomina canales sonoros. A continuación se comenta lo más relevante del canal de sonido SOFAR.

2.3.1.1. El canal de sonido profundo SOFAR

El perfil de la velocidad del sonido típico en zonas profundas del océano a latitudes medias, se corresponde con una zona de velocidades mínimas, aproximadamente a 1000 m, en la que los rayos acústicos tienden a experimentar una pérdida por transmisión mínima, ya que tienden a reflejarse hacia un canal cuando alcanzan zonas de mayor velocidad, alcanzando distancias enormes, es el llamado canal SOFAR (*Sound Fixing and Ranging Channel*). Se han llevado a cabo varios experimentos de transmisión acústica en los que se situaron emisores de baja frecuencia y gran potencia a profundidad de este canal, demostrando que la transmisión del sonido de baja frecuencia a miles de kilómetros es posible.

Estos modelos de transmisión no consideran que las fuentes acústicas de alta intensidad puedan producir ecos en el fondo marino. Si los sonidos son además de bajas frecuencias, con poca atenuación por absorción, pueden darse reflejos múltiples fondo-superficie-fondo, cuyas ondas de presión confluyen en los llamados "puntos de convergencia" de alta presión acústica, creados a veces a varios kilómetros de distancia desde la fuente, y dejar "zonas de sombra" entre estos puntos de convergencia.

Los puntos de convergencia y las zonas de sombra son importantes para la evaluación de los efectos del ruido sobre la fauna marina, así como las respuestas de comportamiento ante sonidos recibidos a distancia, dado que se genera la contradicción aparente de que un animal, localizado en una zona de sombra, pueda acercarse a la fuente de emisión para intentar evitar una zona de convergencia más lejana, quedando por tanto rodeado por áreas con mayor nivel de exposición sonora.

2.3.2. *Multitrayectorias*

Un receptor situado en una localización determinada puede recibir la señal emitida por un emisor a través de varias trayectorias. La presión instantánea medida será la suma de las señales transmitidas por cada una de ellas con su desfase correspondiente. Obtenida la presión instantánea, se puede calcular después la presión máxima y la intensidad media, que son las variables que interesan para cuantificar la contaminación ambiental.

En el caso de los impulsos de muy corta duración como son los que se producen con los cañones de aire, los desfases de las diferentes trayectorias hacen que no coincidan los picos, por lo que el cálculo de la presión de pico (apartado 2.2.3) de la señal suma (apartado 2.3.3) se puede reducir al cálculo de la presión de pico debida exclusivamente a la trayectoria pésima, es decir, la de menor atenuación.

Si a continuación se supone que la relación entre presión de pico y la densidad de energía del impulso es la misma en la señal emitida por la fuente y en la señal recibida, calculando la densidad de energía en el receptor, que se puede hacer aplicando modelos de propagación de la energía, puede deducirse la presión máxima.

2.3.3. *Suma de niveles*

Cuando a un mismo punto llegan dos ondas procedentes de fuentes diferentes o procedentes de la misma fuente pero a través de caminos diferentes, se superponen sus efectos. Esta superposición se traduce en que se suman las presiones y las velocidades instantáneas, pero manteniéndose para cada onda la relación existente entre su presión y su velocidad.

Cuando las magnitudes X_i que hay que sumar vienen expresadas por sus niveles XL_i en dB, el nivel en dB de la suma se calcula mediante la expresión:

$$XL(dB) = 10\ log\left(\sum_i 10^{XL_i/10}\right)$$

Si se trata de presiones, la expresión a utilizar es:

$$XL(dB) = 20\ log\left(\sum_i 10^{XL_i/20}\right)$$

Es frecuente que las cantidades que haya que sumar sean de órdenes de magnitud diferentes, lo que significa que la suma será prácticamente igual que la cantidad mayor. En el caso de sumar dos cantidades que no sean presiones, cuyos niveles se diferencian en 10 dB (el valor absoluto de una es 10 veces superior al de la otra), el resultado es sólo 0,4 dB superior al nivel de la cantidad mayor. Si son presiones, la diferencia de 10 dB significa que la mayor es solo $\sqrt{10}$ veces mayor que la menor y, por lo tanto, el nivel de la suma es 2,4 dB superior al nivel de la mayor.

3. FUENTES DE RUIDO MARINO

3.1. Ruido natural

Los niveles de ruido de fondo son el conjunto de muchas fuentes de ruido oceánico, incluyendo fuentes

naturales y artificiales distantes. El ruido de las fuentes naturales se genera normalmente por procesos físicos o biológicos. Algunos procesos físicos que generan ruido son la tectónica (sísmica), la actividad en la corteza terrestre (volcanes y terremotos), el viento y las olas. Ejemplos de fuentes de ruido biológicas son las vocalizaciones de mamíferos marinos y peces.

El ruido en el agua relacionado con el viento es causado principalmente por la acción de las olas y las salpicaduras. Los niveles de ruido generado por el viento están relacionados con la duración, la velocidad, el fetch[1], la profundidad del agua, la batimetría y la proximidad a la costa. El rango de ruido debido al viento está comprendido entre 100 Hz y 30 kHz, mientras que el ruido generado por las olas son infrasonidos entre 1 y 20 Hz.

Los niveles del espectro de ruido ambiental dependientes del viento se aproximan, usando la regla del cinco de Wenz (1962):

- Disminución de 5 dB por octava en el nivel espectral cuando se incrementa la frecuencia entre 500 Hz y 5 kHz.
- Un incremento de 5 dB en el espectro, cada vez que se dobla la velocidad del viento entre 2,5 y 40 nudos (5-75 km/h).
- Cuando la velocidad del viento es de 5 nudos (9 km/h) el nivel del espectro a 1 kHz en aguas profundas es 51 dB re 1 Pa^2/Hz.
- Cuando la velocidad del viento es de 5 nudos (9 km/h) el nivel de espectro a 1 kHz en aguas poco profundas es de 51 dB re 1 mPa^2/Hz. En aguas someras es 5 dB mayor, es decir, 56 dB re 1 mPa^2/Hz.

Las reglas del cinco de Wenz (1962) son razonablemente válidas hasta 20 kHz, teniendo presente las posibles desviaciones por las variaciones en las condiciones locales.

3.2. Ruido asociado a la extracción de petróleo y gas

Se genera ruido durante todas las fases de la extracción de petróleo y gas. Estas fuentes de ruido pueden ser continuas o impulsivas y transitorias o permanentes. Las fuentes generadoras de ruido son muchas y variadas: los estudios sísmicos (exploración), la estructura de conducción y de colocación de tubos para las operaciones de perforación (instalación), la plataforma (producción) y el desmantelamiento de boca de pozo (clausura). La mayoría de las fuentes continuas de ruido, en términos generales, puede clasificarse como un ruido procedente de la maquinaria, las hélices (cavitación) o excitación hidrodinámica de las estructuras (flujo turbulento). Los ruidos impulsivos son aquellos creados por la rápida expansión y colapso de una burbuja de aire (cañón de aire sísmico) o de la aplicación instantánea de la presión a una estructura sólida (hincado de pilotes). Suelen ser de corta duración. Son causados por las explosiones, por ejemplo, durante la clausura de boca de pozo explosiva (desmantelamiento), los cañones de aire utilizados durante los estudios sísmicos (exploración) o el hincado de pilotes (instalación). Los estudios sísmicos se abordan en el apartado siguiente.

El ruido de la maquinaria procedente de la vibración mecánica se transmite al agua a través del casco del buque, las patas de la plataforma o por el fondo. Dentro del ruido de la maquinaria se puede distinguir entre el motor de propulsión (motores diésel, propulsores, motores principales y engranajes de reducción) y las máquinas auxiliares (generadores, bombas y equipos de aire acondicionado).

Las causas de vibración son los ejes giratorios no balanceados, las discontinuidades repetitivas (dentado del eje, las ranuras del inducido o álabes de la turbina), las partes en movimiento (los pistones del motor), la cavitación y la turbulencia en los fluidos que fluyen a través de tuberías, bombas, válvulas, condensadores y la fricción mecánica.

Se han realizado pocos estudios sobre el ruido en el agua de la torre de perforación y la plataforma. En el caso de plataformas semisumergibles o barcos de perforación el ruido es de baja frecuencia, inferior a 200 Hz.

El ruido hidrodinámico se origina por el flujo de agua que pasa por la estructura de la plataforma (patas o elevadores) o por el casco del buque. Las causas de este ruido son: la vibración inducida, la excitación resonante de cavidades, platos y apéndices y el flujo turbulento dentro de las canalizaciones.

3.3. Estudios sísmicos

Los estudios sísmicos consisten en enviar sonidos de baja frecuencia y alta intensidad, al fondo marino, reflejándose en los límites que definen los diferentes estratos geológicos. El sonido reflejado se procesa para proporcionar información acerca de la estructura y composición de las formaciones geológicas por debajo del lecho marino con el objetivo de identificar posibles yacimientos de hidrocarburos. Durante los estudios sísmicos, la fuente de sonido, por lo general una matriz de cañones de aire comprimido, se remolcan a unos 5 nudos y a una profundidad de 4 a 10 m, registrando las señales reflejadas en matrices de hidrófonos, remolcadas varios kilómetros. Se efectúan los disparos a intervalos de entre 6 a 20 segundos a lo largo de rutas predeterminadas, llamadas transectos. Cada transecto puede ser de varias horas y las campañas pueden durar varios meses con cientos de transectos.

Los estudios sísmicos marinos pueden ser bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D), el tipo de estudio utilizado puede determinar la extensión y la duración de la exposición a altos niveles de sonido.

Los estudios sísmicos 3D se utilizan normalmente para localizar la existencia de yacimientos de hidrocarburos y permiten reducir el número de pozos de exploración. La fuente de sonido utilizada en los estudios tridimensionales es menos fuerte que los utilizados en 2D. Sin embargo, se aumenta el tiempo de exposición al ruido, además, la actividad sísmica se concentra en un área pequeña por un período prolongado.

En general, los cañones de aire individuales producen niveles de sonido de banda ancha entre 215 y 230 dB re 1 µPa a un metro de la fuente. La forma de onda de esta señal se parece a una sinusoide amortiguada, y depende de la energía contenida en el aire comprimido antes de la descarga. Aunque la mayor parte de la energía es producida en las

[1] Longitud de una masa de agua superficial, que es afectada uniformemente en dirección y fuerza del viento, generando a su vez un determinado tipo de oleaje.

frecuencias más bajas, una parte considerable de la energía puede producirse a frecuencias de hasta 22 kHz.

La dirección de la intensidad del sonido es mayor hacia abajo, aunque una cantidad considerable de energía se irradia en direcciones alejándose del eje de haz. La signatura de campo lejano puede detectarse a muchos kilómetros de la fuente en un rango aproximado de 50 a 75 km en agua a entre 25 y 50 m de profundidad. Estas características de propagación implican que los niveles de sonido recibido por un animal en las proximidades de la fuente dependerán de su profundidad y posición con relación al eje de la matriz de cañones de aire.

Los mamíferos de grandes profundidades pueden estar sumergidos por períodos de hasta dos horas. Los cachalotes tienen reservas de energía finamente equilibradas y sólo pasan períodos limitados en la superficie para descansar y recuperarse. Cualquier perturbación durante estos períodos puede suponer la pérdida de alguna condición física a largo plazo o la aptitud reproductiva. Los pequeños odontocetos pueden ser los menos vulnerables a los sonidos de baja frecuencia. Estos son más susceptibles a las componentes de frecuencia más alta de fuentes sísmicas y también a los sonares activos.

En la actualidad existe una tendencia mundial hacia el aumento de la exploración de petróleo en aguas profundas, y esto trae consigo un mayor potencial de conflicto entre las especies de cetáceos que se cree son más vulnerables a los pulsos sísmicos de baja frecuencia, tales como los misticetos y los zifios.

3.4. Tráfico marítimo

El ruido de los barcos domina las aguas marinas. Emana de las hélices, de la maquinaria, del sonar (***So**und **N**avigation **A**nd **R**anging*) y de las sondas de profundidad. La mayor parte del ruido es de frecuencias bajas, inferiores a 1 kHz, que coincide con las frecuencias utilizadas de comunicación y otras actividades biológicas, en particular por las ballenas barbadas. En general, los barcos viejos producen más ruido que los nuevos y buques de mayor tamaño producen más ruido que los pequeños. El ruido de un superpetrolero, a 6,8 Hz, podría detectarse a una distancia comprendida entre 139 y 463 km. El ruido lejano de los barcos se suma al nivel de ruido ambiente constante en el medio marino.

Aunque, por lo general, el transporte marítimo produce frecuencias por debajo de 1 kHz, las pequeñas embarcaciones de recreo generan sonido de 1 kHz hasta 50 kHz (Evans, 1996), que puede impactar con los odontocetos. Las hélices de estos barcos suelen cavitar generando ruido de mayores frecuencias, que pueden resultar perturbadoras a cetáceos más pequeños, que parecen ser más sensibles a los sonidos de alta frecuencia.

3.5. Militar

Las actividades militares son una importante fuente del ruido subacuático. Los buques de guerra usan rutinariamente sonar. Los sistemas de sonar simples dirigen el sonido (pulsos cortos) en una sola dirección, aunque los sistemas más complicados pueden emitir haces de sonido en múltiples direcciones.

Varios estudios han expresado su preocupación por las posibles repercusiones que las actividades militares tienen en los cetáceos. Los cachalotes y las ballenas piloto de aleta larga (calderón común) han mostrado cambios en el comportamiento vocal como respuesta al uso militar del sonar. Durante los ejercicios de la OTAN al oeste de Escocia, en los que se usó el sonar, se observó una disminución significativa en los avistamientos de ballenas Minke (Watkins et al, 1985; Rendell et al, 1999).

Rowles et al. 2000, reportaron que de 49 informes de varamientos masivos de zifios, 8 han sido asociados con las actividades militares y, en todos ellos, aparecía la ballena picuda de Cuvier (*Ziphius cavirostris*) como la especie principal.

En marzo de 2000, en las Bahamas se produjo otro varamiento masivo de 17 cetáceos, incluyendo dos especies de zifios y ballenas Minke. Un informe gubernamental de Estados Unidos determinó que se usó un sonar de frecuencia media (3-7 kHz) en unas maniobras militares (Weiss, 2001). Los investigadores informaron que las ballenas demostraron signos de hemorragia en el oído interno y los espiráculos, relacionados con un fuerte sonido, que no provenían de ninguna explosión cercana (Balcomb et al, 2001). Los niveles de sonido que habrían recibido las ballenas se estimaron entre 140 y 160 dB.

Además del sonar, los sistemas de comunicaciones submarino-submarino son también una sustancial fuente de sonido submarino: los sistemas producen sonidos de 5 a 11 kHz a niveles de la fuente de 180 a 200 dB (Richardson et al, 1995).

Como los militares realizan actividades por todo el mundo, su potencial invasión de hábitats de cetáceos es considerable. Debido a que la información pública sobre la naturaleza exacta y el alcance de actividades militares es muy restringida, el impacto total, en lo relativo a ruido subacuático de origen militar es difícil de cuantificar.

3.6. Hostigamiento de los mamíferos marinos

El dispositivo de acoso acústico (*Acoustic Harassment Devices*, AHD) genera sonido bajo el agua para disuadir a los mamíferos marinos de la pesca, es decir, mantenerlos alejados de las redes y las jaulas de peces.

La industria de la acuicultura sufre la depredación por focas y otros mamíferos marinos, como respuesta, se ha desarrollado el AHD, para impedir que se acerquen a las jaulas de piscicultura. Estos dispositivos producen sonidos de alta potencia, entre 190 y 205 dB, omnidireccionales en las frecuencias de 10 a 25 kHz para ahuyentar a las focas y desplazarlas de los centros de acuicultura. Los dispositivos AHD están diseñados para causar dolor en las focas en un área de hasta 3000 m^2 alrededor de las jaulas de peces. Los AHDs son una causa de preocupación en áreas con acuicultura, especialmente para los cetáceos costeros, tales como las marsopas, el delfín mular y las orcas.

En EE.UU se ha hecho hincapié en que el sonido artificial debe ser introducido en el medio ambiente bajo el agua, sólo cuando los costes y los beneficios de hacerlo sean conocidos y después de haber considerado el impacto ambiental.

3.7. Dragado

Varios estudios han documentado los efectos del ruido producido por las operaciones de dragado en los cetáceos.

Según Bryant et al. 1984, las ballenas grises evitaron la Laguna Guerrero Negro, Baja California, durante varios años después del comienzo de las operaciones de dragado en la zona.

Las ballenas de Groenlandia (*Balaena mysticetus*) expuestas a los aparatos de lectura de grabaciones de ruido de banda ancha de 122-131 dB en niveles recibidos de la draga se desplazaron de la zona. Las ballenas de Groenlandia detuvieron la alimentación y se movieron hasta que estuvieron a más de 2 km de distancia de la fuente sonora. Por otra parte, las vocalizaciones de ballenas disminuyeron y se registraron cambios en los patrones de superficie, respiración y buceo (Richardson et al, 1985a, 1985b; Wartzok et al, 1989). Sin embargo, también se observaron las ballenas de Groenlandia a menos de 800 m de las dragas de succión donde se detectaron los niveles de ruido de 120 dB a 1,2 km del emplazamiento (Richardson et al, 1985b). Por lo tanto, a pesar de que el dragado es una fuente de ruido submarino, se requieren, nuevas investigaciones acerca de los efectos sobre los mamíferos.

3.8. Parques eólicos marinos

Los parques eólicos marinos tienen el potencial de hacer una gran contribución a la producción de energía renovable. Como se trata de una tecnología en desarrollo, se carece de información detallada en relación con los impactos potenciales sobre la vida marina, incluyendo cetáceos.

Los impactos negativos directos pueden incluir la producción de ruido. También puede haber efectos indirectos sobre los cetáceos, como la conexión de cables submarinos que pueden provocar cambios en los patrones de sedimentos locales, que pueden conducir a cambios en el hábitat en las proximidades del parque eólico.

Los parques eólicos en alta mar es una actividad que tiene exigida la evaluación de impacto ambiental (EIA), están incluidos en el anejo II, grupo 4 h) de la LEA (Ley 21/2013, de evaluación ambiental): Instalaciones para producción de energía en medio marino.

3.9. Investigación

Para mejorar el conocimiento y la comprensión de los efectos del ruido antrópico en el corto plazo y el comportamiento de los cetáceos observables, se han hecho algunos esfuerzos para exponer a los cetáceos a sonidos específicos con el objetivo de controlar sus respuestas. Tales estudios están dirigidos a llenar el vacío de datos que hay en la actualidad respecto a las respuestas específicas a sonidos potencialmente dañinos, vulnerabilidades de especies diferentes y los grupos individuales dentro de esas especies, como madre y crías. Lo más urgente sería la evaluación de los umbrales auditivos.

4. MODELOS DE PROPAGACIÓN

Los primeros modelos que se desarrollaron utilizaban la técnica del trazado de rayos, un precedente de la familia de técnicas que ahora se conoce como soluciones basadas en la teoría de rayos. Posteriormente se desarrolló una técnica diferente para resolver problemas en aguas someras, que utilizaba lo que hoy se conoce como modos normales, entonces se la denominó solución basada en la teoría de ondas, como contraposición a la teoría de rayos.

Han aparecido otras técnicas de resolución, pero se sigue manteniendo esa división entre los modelos de rayos y los modelos de ondas para diferenciar los que se basan en la determinación de la posición de los rayos acústicos (acústica geométrica) de los que se basan en la integración directa de la ecuación de Helmholtz.

Actualmente se han agrupado los modelos existentes en las siguientes clases (Schmidt, 1991 y Etter, 2013):

- Modelos de la teoría de rayos:
  - Flujo de energía.
  - Semiempíricos.
  - Basados en el método de las imágenes.

- Modelos de ondas:
  - Modos normales.
  - Campo rápido.
  - Parabólicos.

En la última década se vienen produciendo intentos de mejorar el cálculo del nivel de exposición sonora (SEL) incorporando modelos que tengan en cuenta la distribución y movimiento de individuos de especies sensibles dentro y en el entorno de la zona de operación. Se destaca el modelo *Acoustic Integration Model* (AIM), desarrollado por *Marine Acoustic Inc*. para *U.S. National Marine Fisheries Service* (NMFS). Este modelo simula movimientos de la fuente de ruido y de los mamíferos marinos en distancia y profundidad a lo largo del tiempo de una forma realista. AIM utiliza el método estadístico de Monte Carlo para el submodelo de localización de los individuos, y los submodelos BELLHOP (rayos) y ecuación parabólica (ondas) para la propagación del sonido. Este enfoque permite realizar cálculos estadísticos, por lo que resulta muy apropiado para EsIA que incluyan análisis de riesgos.

Para un EsIA, interesa conocer qué ocurre en las zonas donde el nivel de ruido, medido en la métrica que corresponda, exceda los umbrales establecidos como aceptables. Los límites de estas zonas pueden variar entre algunas decenas de metros (perforación de sondeos, embarcaciones) y algunos kilómetros (sísmicas en zonas de gran profundidad con gran penetración en el subsuelo, típicas de los reconocimientos para la exploración de petróleo y gas). Dado que por simple divergencia geométrica dichos niveles decrecen rápidamente con la distancia a la fuente, es más importante estudiar las zonas cercanas que las muy alejadas.

La calidad de los resultados de un estudio acústico no depende sólo del modelo de propagación utilizado. Es importante cómo se utilice, cómo se hayan modelado la fuente y el medio, qué opciones del modelo se hayan elegido y cómo se presente la información.

Uno de los modelos de propagación utilizados para el EsIA de prospecciones geosísmicas es el de la ecuación parabólica, y más concretamente, el modelo RAM (R*ange-dependent Acoustic Model*), financiado por la *U.S. Office of Naval Research*, o algunas de sus derivaciones (RAMGEO, MONM).

4.1. ACTUP

El Centro para la Ciencia y Tecnología Marinas (*Centre for Marine Science and Technology*, CMST) de la

Universidad de Curtin (Perth, Australia) dispone del software ACTUP[2] para el modelado de la propagación acústica en el agua.

Este paquete de software, incluye los siguientes modelos de propagación: RAMGeo (modelo parabólico), BELLHOP (modelo gaussiano de trazado de rayos), Bounce (cálculo del coeficiente de reflexión según las capas), Kraken (modelo de modo normal), KrakenC (modelo de modo normal complejo) y Scooter (campo rápido).

Se describe a continuación la ejecución de un caso sencillo utilizando los modelos RAMGeo y BELLHOP, ambos dependientes de la distancia (*range*), con el objetivo de calcular la pérdida por transmisión. Los resultados que proporciona cada uno de ellos son apropiados para un rango de frecuencias determinado.

El modelo RAMGeo está basado en la ecuación parabólica, usado para las frecuencias bajas. El modelo BELLHOP, basado en el trazado de rayos, se ha empleado con las frecuencias más altas. La frecuencia a partir de la cual se puede aplicar el método BELLHOP se calcula mediante la expresión: $f > 10 \cdot c/H$, siendo, c, la velocidad del sonido y H, la profundidad. En el caso estudiado el corte de las frecuencias ha sido 100 Hz.

En los siguientes apartados de este epígrafe se muestran los datos introducidos y los resultados obtenidos.

4.1.1. Datos de partida

Los datos introducidos para la ejecución del software han sido el rango de alcance, el perfil de velocidad en el agua, la velocidad del sonido en el fondo, la profundidad de los receptores y la batimetría.

Para el rango de alcance se han tomado 10000 m. Los datos de velocidad hasta una profundidad de 3000 m han sido los del perfil de la figura 1 para el Mar Mediterráneo, considerando constante la densidad (1024 kg/m^3).

Se ha supuesto una capa de fango de 10 m con densidad 1500 kg/m^3 y velocidad del sonido 1700 m/s. Las características del fondo han sido la densidad (2700 kg/m^3) y la velocidad del sonido (5250 m/s). La profundidad de la fuente (Zs) ha sido 10 m en todos los casos. La batimetría con la que se ha trabajado ha sido una rampa descendente, partiendo de una profundidad de 500 m hasta alcanzar los 1500 m a una distancia de 10000 m.

4.1.2. Resultados

Se han calculado las pérdidas por transmisión, según la frecuencia y el modelo aplicado. Las figuras 2 a 5 corresponden al modelo RAMGeo con frecuencias bajas, hasta 100 Hz.

Se observa la disminución de las pérdidas, según se incrementa la frecuencia. Los rangos del eje de profundidad se han ajustado según los valores de las pérdidas debajo del fondo marino. En la parte superior de los gráficos se aprecia cómo se forman ondas entre la superficie del agua y el fondo, que corresponden a las menores pérdidas.

En las figuras 6, 7 y 8 se muestran los resultados obtenidos del modelo BELLHOP con frecuencias de 100, 200 y 500 Hz, respectivamente.

En los gráficos del modelo RAM (figuras 2 a 5) se observa que se ha representado más profundidad de la que se ha introducido en la batimetría, debido a que existen perdidas por transmisión en el fango y debajo del agua. Se recalca que en estas figuras el rango del eje vertical, la profundidad, es diferente, este se ha ajustado para representar las pérdidas menores, que aparecen en los colores azul claro, verde o amarillo.

De estos gráficos se obtienen dos conclusiones, por un lado, en la vértical de la fuente, las pérdidas en el fondo son menores con las frecuencias mas bajas. Se observa que las pérdidas menores que corresponden a los colores amarillos, verdes y azules claro, llegan a las profundidades de 3000, 1500 y 800 m con las frecuencias 20, 50 y 100 Hz, respectivamente.

También se ha obtenido que según se incrementa la frecuencia, alejandose de la fuente en horizontal, disminuyen las pérdidas en el agua, aunque es dificil cuantificar, en los gráficos se aprecian colores más claros para la frecuencia de 100 Hz (figura 5) que para la frecuencia de 10 Hz (figura 2).

En las figuras 6, 7 y 8, generadas con el modelo BELLHOP, no se han calculado las pérdidas en el fondo, porque el modelo no lo permite. El eje vertical representa la profundidad hasta 150 m, correspondiente al menor valor de la batimetría. En el eje horizontal, el rango también es el mismo para las tres figuras (0-10000 m).

Las figuras 5 y 6 se han obtenido con los modelos RAMGeo y BELLOP, respectivamente, para la misma frecuencia (100 Hz). Las pérdidas por transmisión son mayores con el modelo RAMGeo que con BELLHOP.

Con el modelo BELLHOP se observa, que según se incrementa la frecuencia, se incrementan las pérdidas por transmisión, es decir, se aprecian más zonas con tonos oscuros con la frecuencia de 500 Hz (figura 8) que con la frecuencia de 100 Hz (figura 6), aunque en las tres frecuencias, figuras 6 a 8 en el extremo superior derecho aparece una zona de color oscuro que se hace más pequeña según aumenta la frecuencia.

En las figuras 9 a 13 se han representado los perfiles verticales a una distancia horizontal (rango, Rr) de 100 m de la fuente y los cortes en horizontal a una profundidad (Zr) aproximada de 50 m (figuras 14 a 18), con el fin de comparar las pérdidas por transmisión representadas en ambos modelos.

Las figuras 9, 10 y 11 corresponden a perfiles verticales, que representan las pérdidas por transmisión en función de la profundidad a una distancia de la fuente de 100 m (Rr = 100m). Las dos primeras (figuras 9 y 10) con diferentes frecuencias (10 y 100 Hz) y el mismo modelo (RAMGeo). Las dos últimas con la frecuencia de 100 Hz obtenidas con diferente modelo RAMGeo (figura 10) y BELLHOP (figura 11). El eje vertical, la profundidad, y el eje horizontal que representa las pérdidas en dB, tienen diferentes valores en cada gráfico.

El comportamiento de los dos gráficos correspondientes al modelo RAMGeo es similar, desplazando los picos y aumentando o disminuyendo estos. Se observa un

[2] http://cmst.curtin.edu.au/products/underwater/

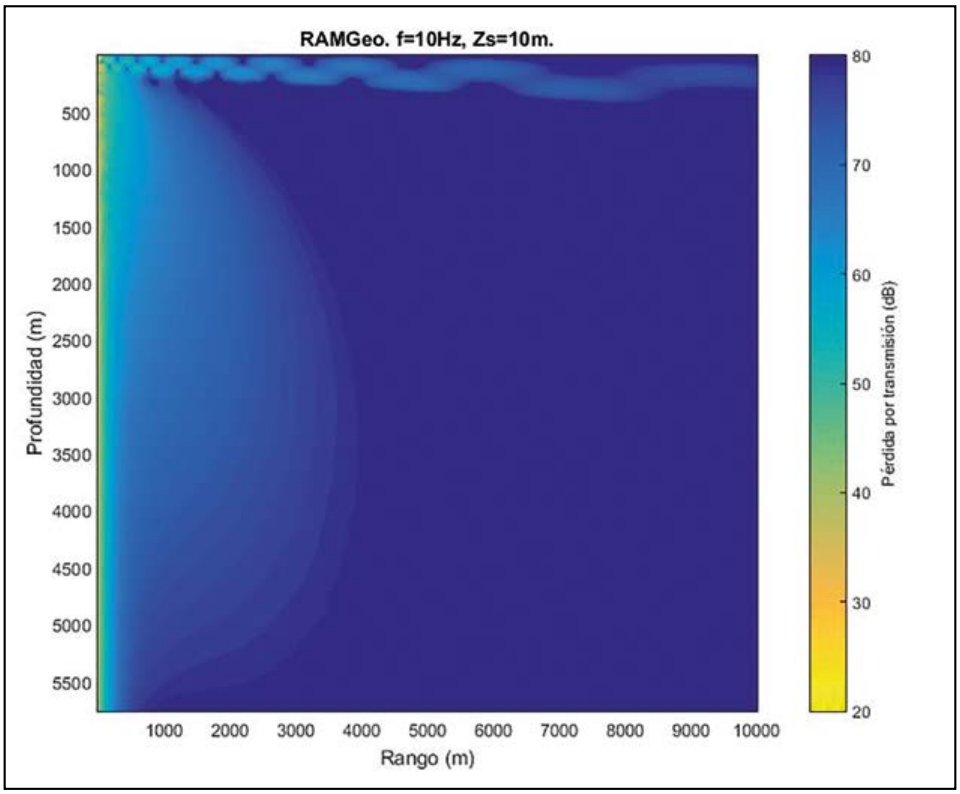

Figura 2. Pérdidas por transmisión: RAMGeo, f = 10 Hz.

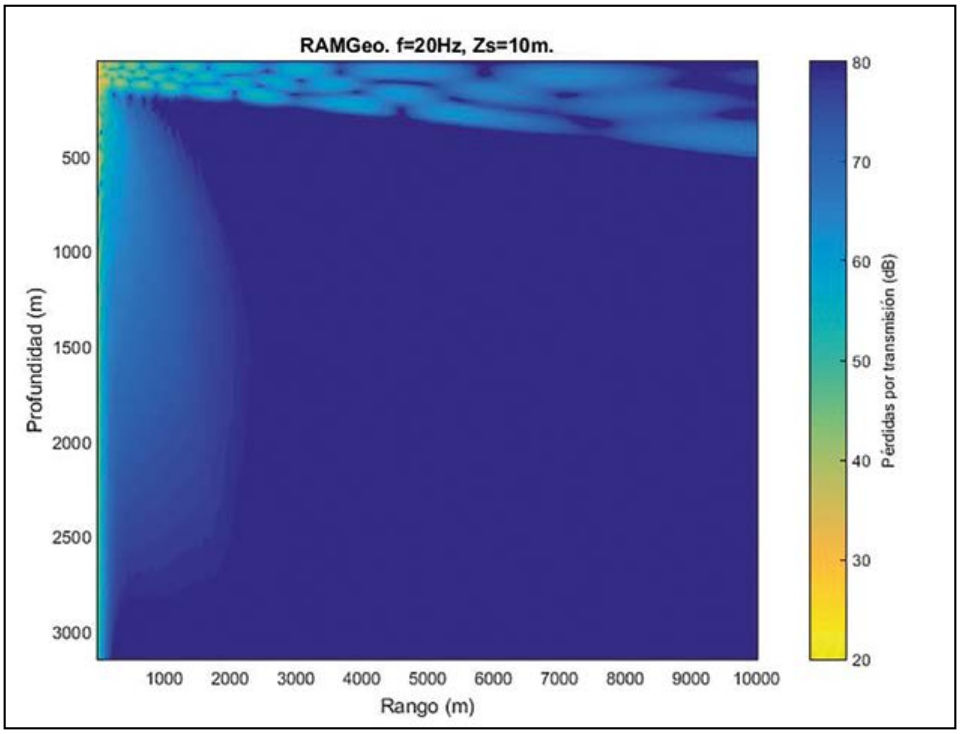

Figura 3. Pérdidas por transmisión: RAMGeo, f = 20 Hz.

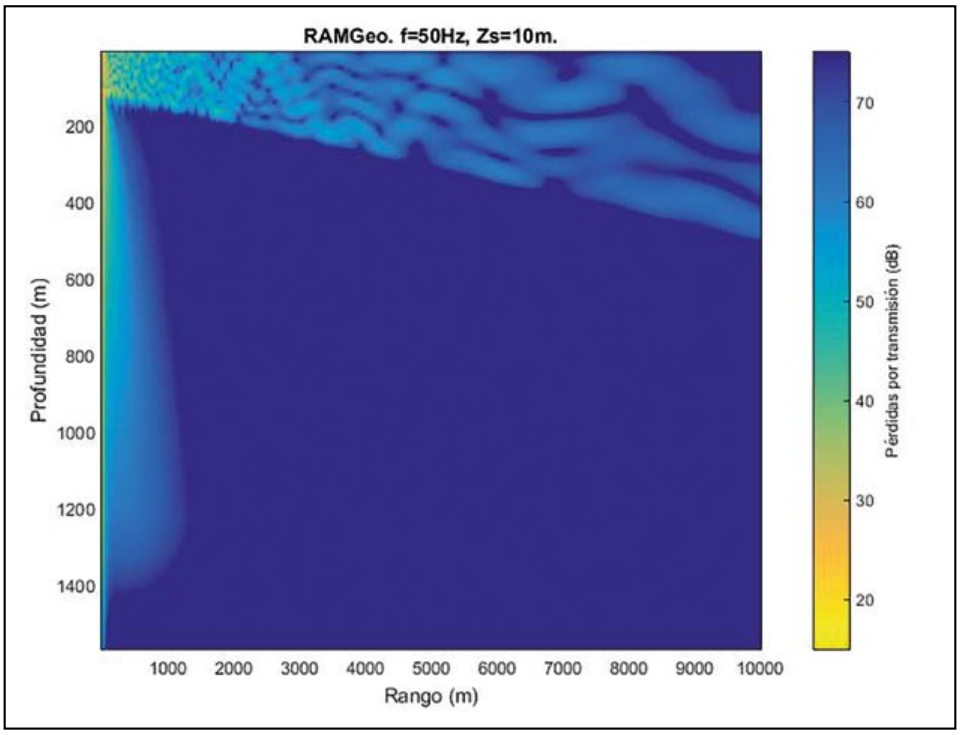

Figura 4. Pérdidas por transmisión: RAMGeo, f = 50 Hz.

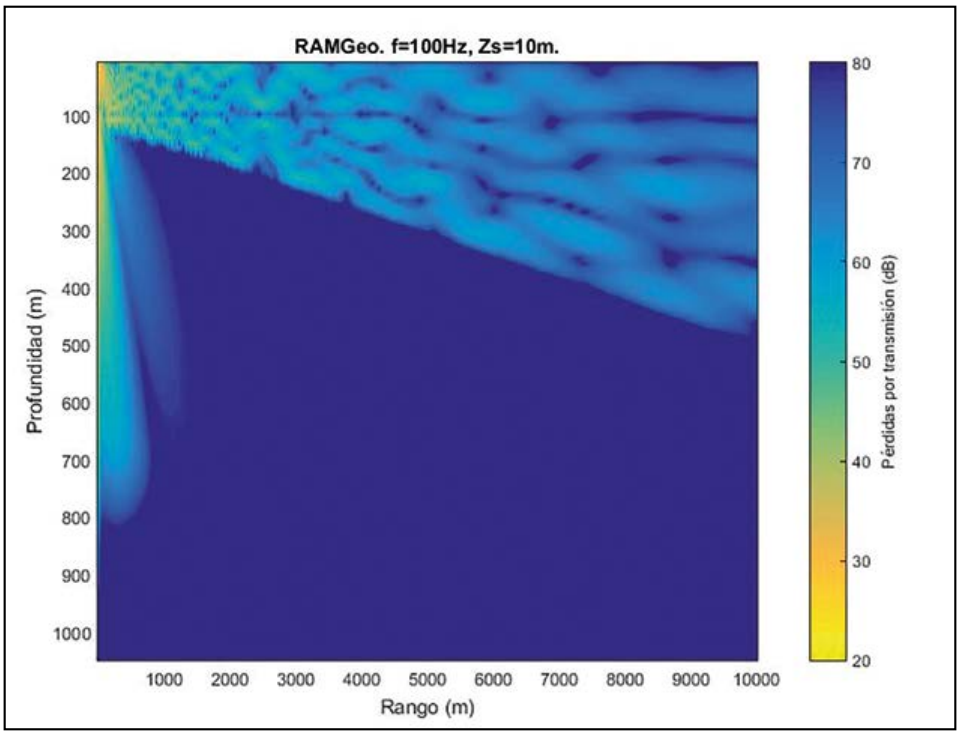

Figura 5. Pérdidas por transmisión: RAMGeo, f = 100 Hz.

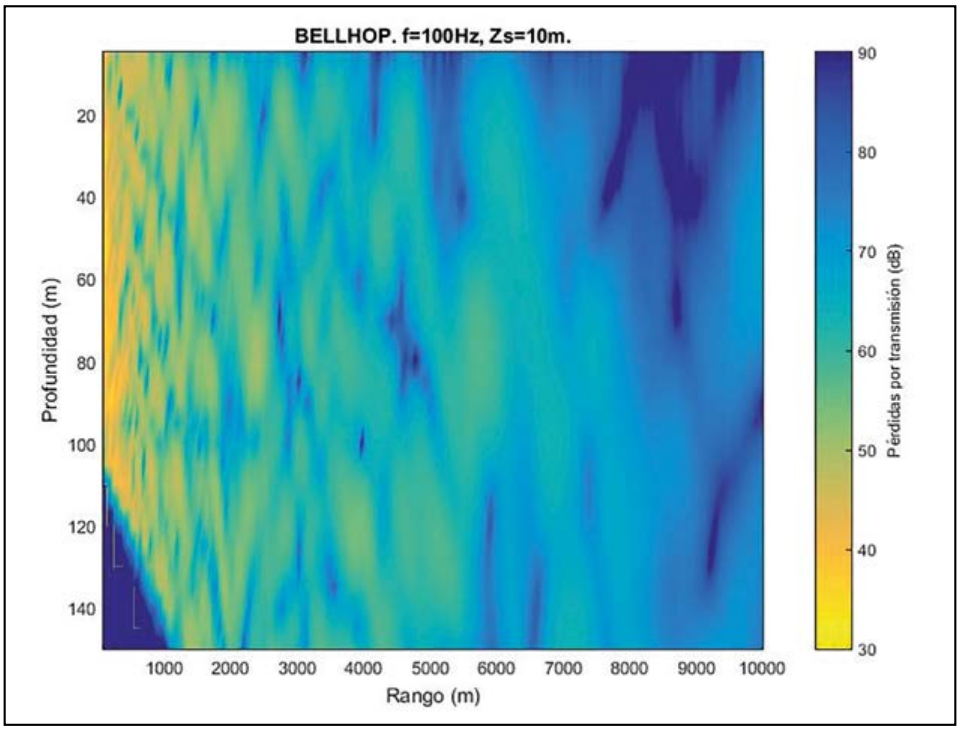

Figura 6. Pérdidas por transmisión: BELLHOP, f = 100 Hz.

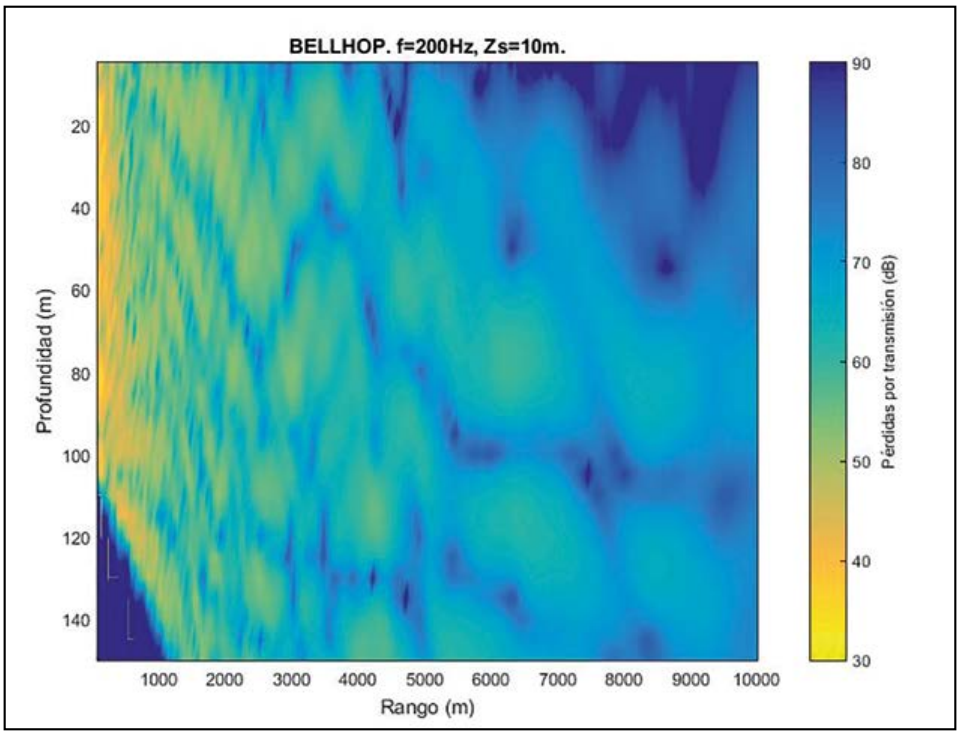

Figura 7. Pérdidas por transmisión: BELLHOP, f = 200 Hz.

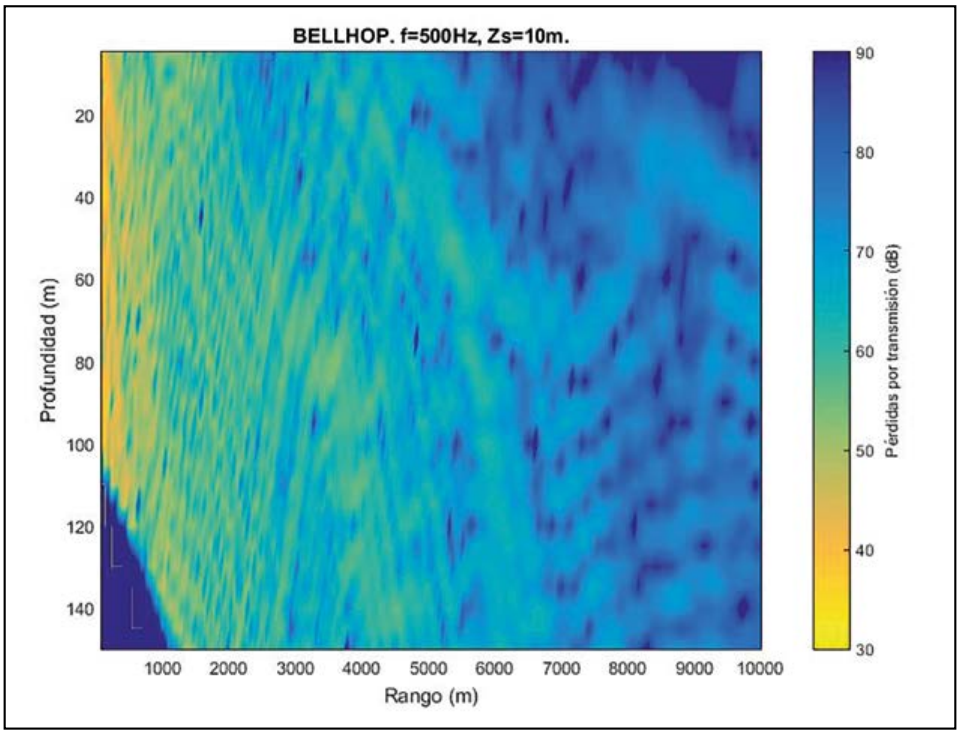

Figura 8. Pérdidas por transmisión: BELLHOP, f = 500 Hz.

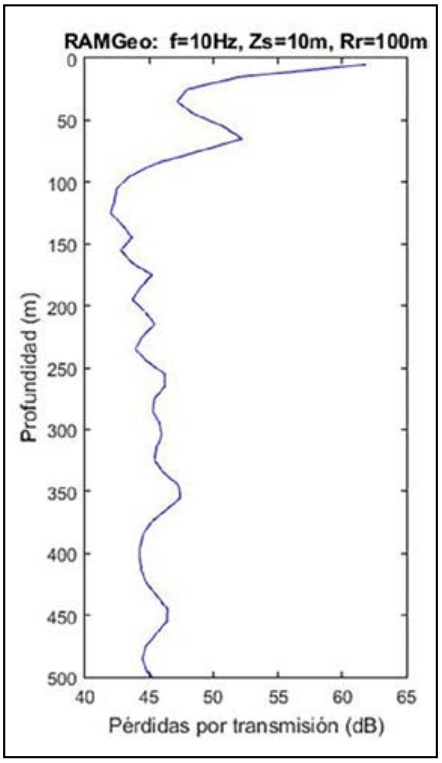

Figura 9. Perfil de pérdidas a 100 m de la fuente. RAMGeo, f=10 Hz.

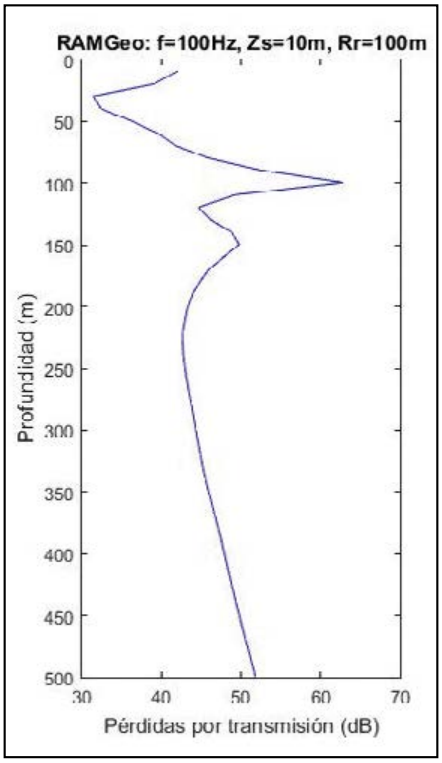

Figura 10. Perfil de pérdidas a 100m de la fuente. RAMGeo, f=100 Hz.

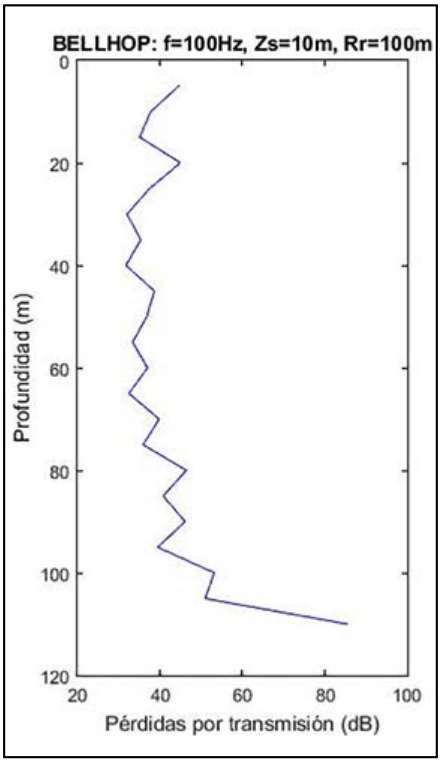

Figura 11. Perfil de pérdidas a 100 m. BELLHOP, f=100 Hz.

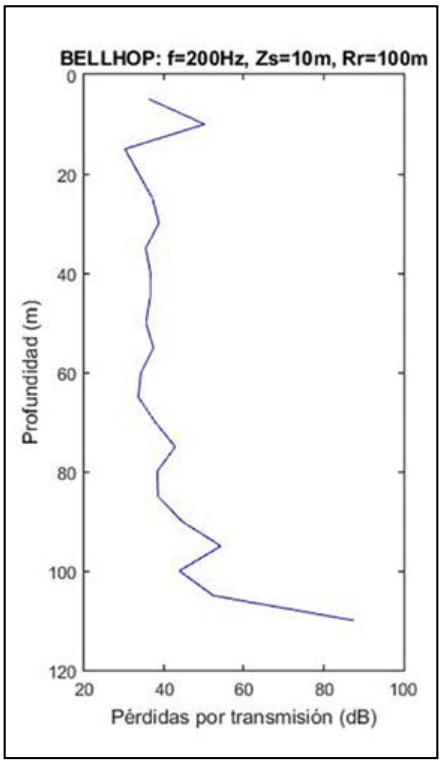

Figura 12. Perfil de pérdidas a 100 m de la fuente. BELLHOP, f = 200 Hz.

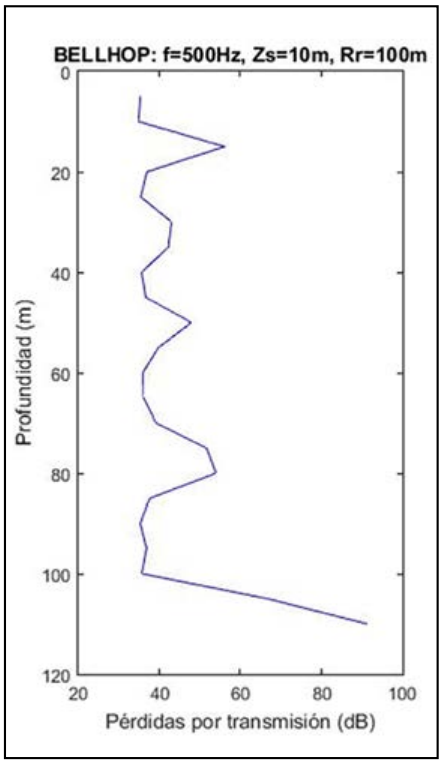

Figura 13. Perfil de pérdidas a 100 m de la fuente. BELLHOP, f = 500 Hz.

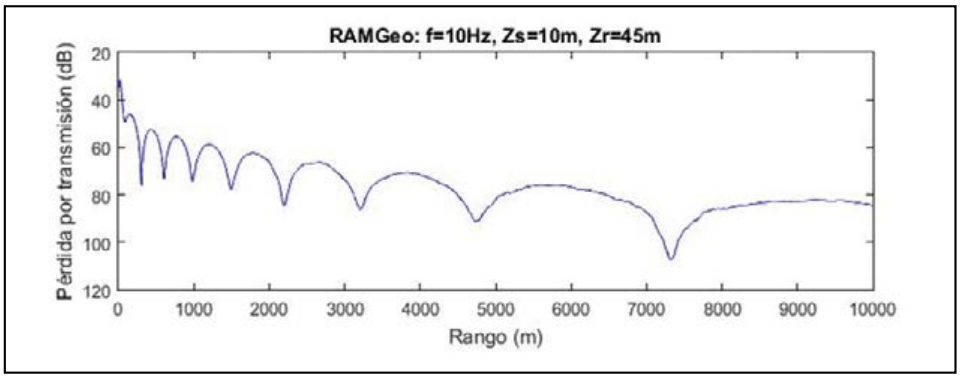

Figura 14. Pérdidas por transmisión: RAMGeo, profundidad = 50 m, f = 10 Hz.

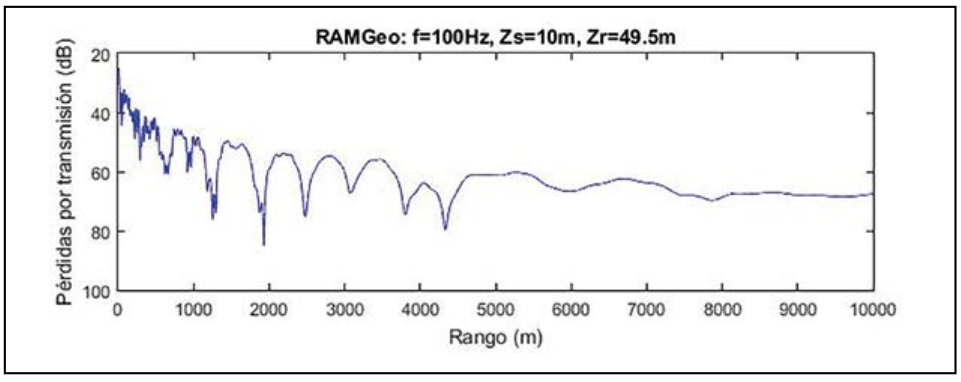

Figura 15. Pérdidas por transmisión: RAMGeo, profundidad = 50 m, f = 100 Hz.

alisamiento de la curva para la frecuencia de 100 Hz y mayores pérdidas a partir de los 75 m.

Para la frecuencia de 100 Hz, con el modelo RAMGeo se aprecia que hasta la profundidad de 200 m las pérdidas están sobre los 50 dB, con dos picos importantes, mientras que con el modelo BELLHOP estas pérdidas se alcanzan a partir de los 100 m.

Las figuras 12 y 13 obtenidas con el modelo BELLOP, con frecuencias de 200 y 500 Hz, respectivamente presentan un comportamiento similar, aumentando las pérdidas a partir de los 100 m. La figura 12, correspondiente a la frecuencia de 200 Hz, presenta menos picos que la de 500 Hz.

Las figuras 14 a 18 corresponden a los cortes horizontales, representan la pérdida por transmisión en función de la distancia (rango) desde la fuente a una profundidad aproximada de 50 m (Zr ≈ 50 m). Las dos primeras (figuras 14 y 15) para las frecuencias de 10 y 100 Hz, obtenidas con el modelo RAMGeo presentan una serie de lóbulos, que se convierten en dientes de sierra en las tres figuras siguientes (figuras 16, 17 y 18) del modelo BELLHOP, con frecuencias de 100, 200 y 500 Hz.

El gráfico obtenido con el modelo RAMGeo, f = 10 Hz (figura 14) tiene un comportamiento similar al del modelo RAMGeo, f = 100 Hz (figura 15) hasta los 4500 m aproximadamente. A partir de esta distancia se observa un alisamiento de la curva y estabilización de las pérdidas por transmisión sobre los 60 dB para la frecuencia de 100 Hz (figura 15).

En las figuras 16, 17 y 18, correspondientes al modelo BELLHOP con frecuencias de 100, 200 y 500 Hz, respectivamente, se aprecia una tendencia creciente en las pérdidas conforme nos alejamos de la fuente. La diferencia entre ellas está en la longitud de los intervalos que dan los máximos y mínimos relativos.

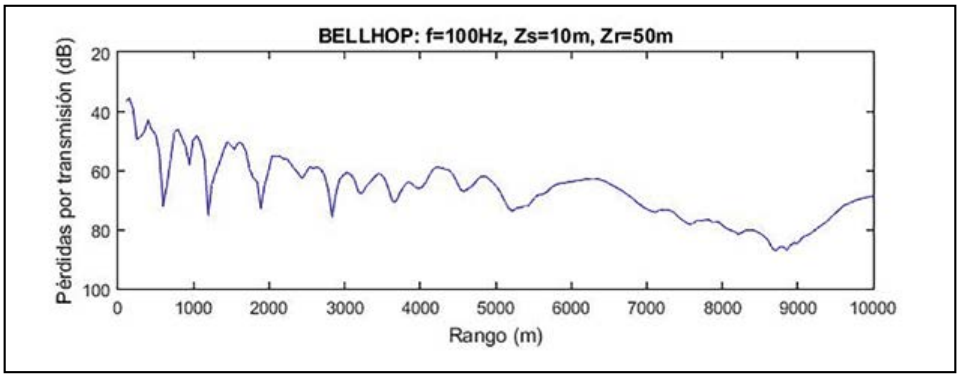

Figura 16. Pérdidas por transmisión: BELLHOP, profundidad = 50 m, f = 100 Hz.

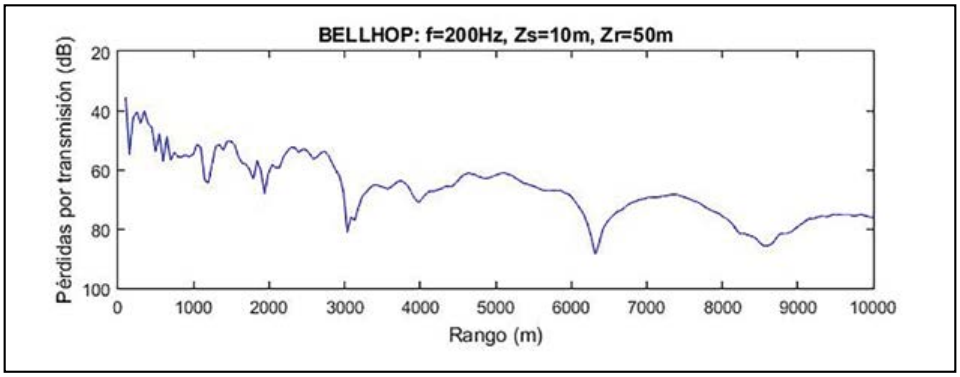

Figura 17. Pérdidas por transmisión: BELLHOP, profundidad = 50 m, f = 200 Hz.

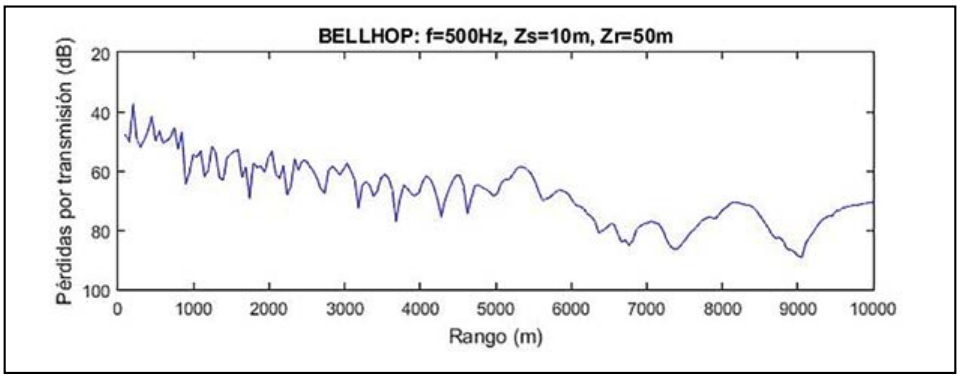

Figura 18. Pérdidas por transmisión: BELLHOP, profundidad = 50 m, f = 500 Hz.

5. UMBRALES DE RUIDO SUBACUÁTICO PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

La legislación española relacionada con el ruido subacuático está formada por las siguientes normas:

- Ley 37/2003 del Ruido
- Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y la Biodiversidad
- Ley 41/2010 de Protección del Medio Marino
- Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental

También son de aplicación en España varios instrumentos de carácter internacional (Convenio sobre Derecho del Mar, Convenio OSPAR, Convenio de Barcelona, Convenio de Bonn, Acuerdos ACCOBAMS y ASCOBANS) y comunitario (Directiva marco sobre la Estrategia Marina y Directiva Habitats). Por el momento no existe en nuestro país ninguna norma legal que establezca umbrales cuantitativos de ruido subacuático como criterios de evaluación de impactos.

Sólo se han podido localizar umbrales cuantitativos de ruido subacuático como criterios de evaluación de impactos en los EE.UU., en el Reino Unido y en Nueva Zelanda[3]. En Dinamarca, para Groenlandia, existe un documento[4] en el que se incluye una revisión actualizada de los criterios propuestos en estudios científicos y se define con gran detalle la información que debe presentarse como parte del EsIA. Ésta incluye unos mapas de resultados de modelos acústicos donde se representan las siguientes variables: presiones (de pico y RMS) re 1 μPa y niveles de exposición re 1 μPa^2·s para un impulso individual y acumulado durante un intervalo de 24 horas, pero no se establecen valores concretos de los umbrales máximos de exposición.

5.1. Efectos del ruido sobre la fauna marina

Los grupos de especies que se suelen considerar como receptores de los impactos con características diferenciadas son:

- Cetáceos:
  - Misticetos[5]: Sensibles a sonidos de baja frecuencia, como las ballenas.
  - Odontocetos[6]:
    - Sensibles a medias frecuencias: delfines, cachalotes, zifios.
    - Sensibles a altas frecuencias: marsopas.
- Pinnípedos[7]:
  - Fócidos (focas).
  - Otáridos (leones marinos).
- Tortugas marinas.
- Peces:
  - Planos.
  - Con vejiga natatoria.
- Invertebrados marinos.

Existen diferentes categorías de efectos del ruido sobre la fauna marina. De mayor a menor gravedad pueden considerarse las siguientes:

- Mortalidad y daños permanentes (fisiológicos y físicos no auditivos).
- Daños auditivos permanentes y temporales.
- Cambios de comportamiento, como evitación o molestias.
- Confusión por enmascaramiento de sonidos útiles como la comunicación o la ecolocalización.

5.2. Umbrales auditivos de diversos grupos de especies. Funciones de ponderación

La sensibilidad de los animales marinos a los sonidos de diferentes frecuencias se expresan mediante audiogramas, que son gráficos que muestran los umbrales de percepción en función de éstas. Los audiogramas se obtienen normalmente mediante ensayos de comportamiento de animales en cautividad, aunque también pueden obtenerse a partir de respuestas electrofisiológicas.

Los resultados obtenidos muestran una gran variabilidad, no solo entre especies, sino también entre individuos de la misma especie. Incluso un mismo individuo puede no comportarse igual en diferentes ocasiones en las que se le somete al mismo nivel de ruido. En particular, es probable que, como los humanos, con la edad vayan perdiendo capacidad auditiva, sobre todo a altas frecuencias.

A pesar de todo, las semejanzas son suficientes como para poder hablar de patrones auditivos por grupos de especies. La sonoridad o percepción subjetiva del sonido no depende solo de la frecuencia sino también de la intensidad. Las curvas[8] para odontocetos y pinnípedos son una composición de los umbrales mínimos medidos para múltiples especies. El rango para los misticetos es una estimación basada en la anatomía del oído o inferida de los sonidos emitidos.

Un grupo de expertos en varias disciplinas de la acústica subacuática, física, fisiológica y de conducta, dedicaron varios años a hacer una recopilación y revisión de la creciente literatura existente sobre audición de los mamíferos marinos y sobre sus respuestas fisiológicas y de conducta a los ruidos antropogénicos, con el fin de proponer criterios de exposición para ciertos efectos (Southhall et al,

[3] Department of Conservation "*2013 Code of Conduct for Minimising Acoustic Disturbance to Marine Mammals from Seismic Survey Operations*".

[4] http://www.govmin.gl/images/stories/petroleum/environmental_reports/EMA_Guidelines_to_environmental_mitigation_assessment_of_seismic_activities_in_Greenland_waters.pdf

[5] Misticetos: mamíferos marinos que carecen de dientes y en su reemplazo poseen barbas córneas, cuya función es filtrar el agua del mar para capturar el alimento, como las ballenas grises y los rorcuales.

[6] Odontocetos: mamíferos marinos caracterizados por la presencia de dientes. Ejemplos de misticetos son las ballenas blancas, los cachalotes, los delfines y las orcas.

[7] Los pinnípedos son mamíferos carnívoros adaptados a la vida acuática. Son de cuerpo alargado, patas cortas, manos y pies palmeados en forma de aleta. Se dividen en tres familias, los otáridos (osos, lobos y leones marinos), los fócidos (focas) y los odobénidos (morsas).

[8] http://www.dosits.org/animals/advancedtopics/hearingloss/hearingcurvenotes/

2007), este documento se ha convertido en una referencia obligada en este tema y ha sido muy tenida en cuenta para el establecimiento de criterios por diversas Administraciones como U.S. National Marine Fisheries Service (NMFS).

En lo que se refiere a las funciones de ponderación, en esta publicación se establecen 4 grupos de especies de mamíferos marinos por sus características auditivas y existe una función o filtro de ponderación para cada uno de ellos. Reciben el nombre de filtros de ponderación M (*M-weighting functions*).

El NMFS ha adoptado la división que aparece en la tabla 2 sobre los grupos de especies, que se diferencia de la propuesta por Southhall et al, 2007 en que extiende la frecuencia límite superior para los misticetos de 22 a 30 kHz, diferencia entre los pinnípedos fócidos y otáridos y cambia de grupo a dos especies de delfines pasándolas desde el de frecuencias medias al de frecuencias altas.

Tabla 2. Funciones o filtros de ponderación. Fuente: NMFS 2013

Grupo de audición funcional	Rango de audición funcional
Cetáceos, baja frecuencia (misticetos)	7 Hz a 30 kHz
Cetáceos, frecuencia media (delfines, odontocetos)	150 Hz a 160 kHz
Cetáceos, alta frecuencia (marsopas, delfines de río, *Kogia, Cephalorhynchus, Lagenorhynchus cruciger y L. australis)*	200 Hz a 180 kHz
Pinnípedos fócidos (focas verdaderas)	75 Hz a 100 kHz
Pinnípedos otáridos (leones y lobos marinos)	100 Hz a 40 kHz

David (2011), propone un audiograma genérico tomando el valor mínimo para cada frecuencia de una amplia colección de audiogramas incluyendo los de los submarinistas. En él se basa una propuesta de criterio para evaluación ambiental que fue desarrollada por el Ministerio de Defensa del Reino Unido para evaluar las actividades con sonar de baja frecuencia y que se ha aplicado también a la evaluación de la demolición de una plataforma petrolífera en el Mar del Norte.

5.3. Criterios para la evaluación del impacto ambiental

Se han definido diferentes métricas para expresar el nivel de una onda acústica, cada una de las cuales es más o menos adecuada a cada tipo de fuente (impulso único, impulso repetido o emisión continua) y a cada tipo de efecto, por lo que es importante conocer cómo se han calculado los valores en el EsIA y cómo deben aplicarse los criterios.

Actualmente no existen conclusiones definitivas sobre la métrica más adecuada para expresar cada tipo de efecto sobre cada grupo de especies, tampoco sobre los umbrales de ruido correspondientes.

5.3.1. Criterios generales

El criterio del Reino Unido se ha basado por un lado, en el audiograma genérico obtenido tomando los valores mínimos de una amplia colección de audiogramas específicos. Se trata por tanto de un criterio genérico aplicable a todos los grupos de especies. La otra base de apoyo es un gráfico construido partiendo de la representación de la extrapolación al medio marino de los resultados obtenidos de dos estudios realizados para ruido atmosférico: CHABA 1968 y NIOSH 1995, donde aparecen los niveles por encima del umbral auditivo en función del tiempo de exposición, acumulado, para los casos en los que se empieza a producir pérdida de audición.

Tomando como referencia estas representaciones se trazan dos líneas paralelas entre sí y paralelas a la dirección general de los datos experimentales, una un poco por encima, que representará el límite para los daños permanentes (PTS), y otra por debajo, que representará el límite para los daños temporales (TTS).

En Nueva Zelanda, si se sobrepasan los 171 dB re 1 $mPa^2 \cdot s$ en las zonas de exclusión correspondientes a las especies de interés, o los 168 dB re 1 $mPa^2 \cdot s$ en la zona de exclusión de 200 m, debe aumentarse el radio de la zona donde se emplearán las medidas de mitigación o reducir la potencia de la fuente.

5.3.2. Criterios para los mamíferos marinos

Este grupo animal ha sido el más estudiado hasta el momento. En los mamíferos, los ruidos de alta intensidad pueden producir rotura del tímpano, daños en la cadena de huesecillos del oído medio o sobreestimulación de las células ciliadas que convierten los movimientos de fluido causados por el ruido en impulsos neurológicos que se envían al cerebro. Exposiciones menores pueden provocar pérdidas auditivas denominadas desplazamientos de umbrales (*Threshold shift*, TS), que pueden ser permanentes (PTS) o temporales (TTS). Estas pérdidas auditivas pueden afectar la capacidad del animal para reaccionar a los sonidos útiles de su entorno, poniéndolos en peligro. La PTS se considera "daño" y la TTS, "perturbación del comportamiento".

La amplitud, duración, frecuencia y evolución temporal de la exposición al ruido influyen en el grado de TS. Para sonidos continuos, exposiciones de igual energía producen aproximadamente los mismos efectos. Para sonidos intermitentes, el grado de TS para una misma energía es menor que si el sonido es continuo porque se produce una cierta recuperación en los intervalos entre impulsos. Por ello, basar un criterio de evaluación en la energía total recibida para sonidos impulsivos intermitentes como el que generan los cañones de aire proporciona un margen de seguridad adicional.

El NMFS considera también que niveles de exposición inferiores a los necesarios para producir TTS (sub-TTS) pueden provocar otras perturbaciones de comportamiento relacionadas con la migración, la alimentación o la frecuencia de salidas a la superficie.

En el *Documento Técnico sobre impactos y mitigación de la contaminación acústica marina*, editado por el MAGRAMA en 2012, se da el nivel de seguridad y la zona de exclusión:

"El nivel de seguridad más aceptado por la industria sísmica para reducir el impacto en la fauna marina es de 180 dB re. 1 µPa RMS, aunque los protocolos para los buceadores humanos, por ejemplo el de NURC (NATO Undersea Research Center) recomiendan utilizar el nivel de 160 dB re. 1 µPa RMS (SACLANTCEN, 1998)".

En NMFS (2013), que es un borrador de guía de evaluación de efectos sobre los mamíferos marinos para PTS

y TTS, se establece un doble criterio: un umbral para la presión de pico ($SPL_{0\text{-}p}$) y otro para la energía acumulada (SEL_{cum}), diferentes para los efectos PTS o TTS, y diferentes también según se trate de ruido impulsivo o no impulsivo. Además, se permite que el SEL_{cum} se calcule filtrando o sin filtrar previamente con las funciones de ponderación, aunque, naturalmente, los umbrales aplicables en cada caso son diferentes. Para los ruidos no impulsivos, los umbrales son los que aparecen en la tabla 3.

En cuanto al tiempo de integración (apartado 2.2.4) al que se refieren los valores umbrales de nivel de exposición de estas tablas, en el documento se explica que el tiempo de integración debe ser la duración de la actividad.

Obsérvese que el NMFS todavía no ha propuesto nuevos umbrales para otro tipo de efectos (confusión en la percepción de los sonidos, cambios de comportamiento, enmascaramiento de señales de socialización o de ecolocalización), por lo que debe considerarse que los límites de 160 dB para $SPL_{RMS,\ impulso}$ y de 173 dB re 1 $mPa^2 \cdot s$ para SEL aún siguen en vigor. Por coherencia con los umbrales establecidos para PTS y TTS, el tiempo de integración para este último límite debería ser también la duración de la actividad.

5.3.3. *Criterios para otros grupos de especies*

Existen resultados de estudios científicos en los que se ha observado algún tipo de efecto para algunas especies. En el *Documento Técnico sobre impactos y mitigación de la contaminación acústica marina* (MAGRAMA, 2012) se recoge una recopilación de resultados para tortugas marinas (cambios de comportamiento entre 166 y 175 dB re 1 mPa_{RMS}, 175-179 dB re 1 mPa para TTS), para cefalópodos (156-174 dB re 1 mPa_{RMS}) y para peces (daños en la vejiga natatoria para 217-220 dB re 1 $mPa_{p\text{-}p}$; perturbaciones de comportamiento para 156 dB re 1 mPa_{RMS}).

5.4. Aplicación de los criterios

5.4.1. *Zonas de exclusión*

Un modo de aplicación de los criterios establecidos mediante umbrales consiste en calcular el valor de SPL_{RMS}, $SPL_{o\text{-}p}$ o SEL en todo el dominio a partir de los resultados de un modelo de propagación y determinar las zonas en las que dichos umbrales son sobrepasados. En estas zonas

Tabla 3. Umbrales por daños auditivos debidos a fuentes no impulsivas. Fuente: NMFS 2013

	Sin filtrar		Filtrados	
	PTS	TTS	PTS	TTS
Cetáceos LF	Fuente: NB ≥ 10kHz 230 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 215 dB SEL_{cum} Fuente: Resto 230 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 198 dB SEL_{cum}	Fuente: NB ≥ 10kHz 224 dB $SPL_{o\text{-}p}$ 195 dB SEL_{cum} Fuente: Resto 224 dB $SPL_{o\text{-}p}$ 178 dB SEL_{cum}	230 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 198 dB SEL_{cum}	224 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 178 dB SEL_{cum}
Cetáceos MF	Fuente: NB ≥ 3kHz 230 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 198 dB SEL_{cum} Fuente: Resto 230 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 215 dB SEL_{cum}	Fuente: NB ≥ 3kHz 224 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 178 dB SEL_{cum} Fuente: Resto 224 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 195 dB SEL_{cum}	230 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 198 dB SEL_{cum}	224 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 178 dB SEL_{cum}
Cetáceos HF	Fuente: NB ≥ 3kHz 201 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 180 dB SEL_{cum} Fuente: Resto 201 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 199 dB SEL_{cum}	Fuente: NB ≥3kHz 195 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 160 dB SEL_{cum} Fuente: Resto 195 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 179 dB SEL_{cum}	201 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 180 dB SEL_{cum}	195 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 160 dB SEL_{cum}
Pinnípedos fócidos	235 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 197 dB SEL_{cum}	229 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 183 dB SEL_{cum}	235 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 197 dB SEL_{cum}	229 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 183 dB SEL_{cum}
Pinnípedos otáridos	235 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 220 dB SEL_{cum}	229 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 206 dB SEL_{cum}	235 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 220 dB SEL_{cum}	229 dB $SPL_{0\text{-}p}$ 206 dB SEL_{cum}

LF: ***Low Frequency*** (frecuencias bajas), MF: ***Medium Frecuency*** (frecuencias medias), HF: ***High Frecuency*** (frecuencias altas), NB: ***Narrow Band*** (banda estrecha).

Tabla 4. Zonas de exclusión

País	Radio (m)	dB re 1 mPa_{RMS}	Fuente
Reino Unido, Golfo de Méjico, Canadá	500		
Australia	3000		Castellote, 2007
Brasil (apagado de cañones)	500		
Brasil (arranque suave)	1000		
Nueva Zelanda	200-1500		*1
California		180	Finneran et al, 2012
España		160/180	MAGRAMA, 2012

*1 Code of Conduct for Minimising Acoustic Disturbance to Marine Mammals from Seismic Survey Operations, 2013.

previsiblemente se producirán los efectos correspondientes a cada tipo de umbral y, por lo tanto, se deberán establecer las medidas de mitigación que se consideren convenientes, como las zonas de exclusión, de vigilancia o de afección.

El establecimiento de zonas de exclusión es una medida de mitigación necesaria. Se define como el radio horizontal alrededor de una fuente de ruido dentro del cual se llevan a cabo medidas de mitigación en tiempo real en caso de que se detecten individuos de determinados grupos de especies. En la tabla 4 se ha recopilado la delimitación de las zonas de exclusión de varios países.

En Brasil se han establecido 500 m para el apagado de los cañones, pero 1000 m para el arranque suave (*softstart*).

En Nueva Zelanda si se sobrepasan los 171 dB re 1 $mPa^2 \cdot s$ en las zonas de exclusión correspondientes a las especies de interés, o los 168 dB re 1 $mPa^2 \cdot s$ en la zona de exclusión de 200 m, debe aumentarse el radio de la zona donde se emplearán las medidas de mitigación o reducir la potencia de la fuente. Para los cañones de aire se han establecido varios radios según el volumen total de la matriz de cañones y el grupo de especies (cetáceos con crías, una lista específica de especies de interés que aparece en las directrices o mamíferos marinos en general); van desde los 200 m hasta los 1500 m.

En California se define como "el radio dentro del cual el nivel de ruido pueda producir al menos daños auditivos temporales", estableciéndose como umbral para ello 180 dB re 1 µPa (RMS), lo que significa que debe calcularse caso por caso en función de las características de la fuente y del emplazamiento concretos.

En España, el *Documento Técnico sobre impactos y mitigación de la contaminación acústica marina* (MAGRAMA, 2012), dice: "La zona de exclusión se define como el área circular que abarca niveles de ruido de hasta 180 dB re 1 µPa (RMS) medido desde el punto central de los cañones de aire. Este es el umbral de ruido que tiene la capacidad potencial de provocar daños fisiológicos en el sistema auditivo de los cetáceos. El radio de este área ha de ser definido por modelización acústica basada en el tipo y nivel de fuente propuesta y las condiciones ambientales del área a prospectar o que más se aproximen… Según características del medio, mediante la modelización suelen obtenerse distancias de 300 hasta 3000 metros como zonas de exclusión... En el caso de no haber suficiente información para definir restricciones espaciales y temporales para evitar el solapamiento de actividades de prospección sísmica en áreas de presencia de especies de cetáceos sensibles, es recomendable ampliar la zona de exclusión: un área definida por el radio de 180 dB re 1 µPa (RMS) donde se requiere parar los cañones si se avista cualquier cetáceo y otra área mayor definida por el radio de 160 dB re 1 µPa (RMS), donde se requiere parar los cañones si los MMO avistan la especie sensible en cuestión. El umbral de 160 dB re 1 µPa (RMS) corresponde con el umbral de ruido que provoca cambios de comportamiento". Esto significa que debe calcularse también, caso por caso, en función de las características de la fuente y del emplazamiento.

El sistema de las zonas de exclusión presenta ventajas indudables desde un punto de vista operativo, pero aplicar tamaños fijos independientemente de la potencia de la fuente, del perfil de velocidades y de los grupos de especies potencialmente afectadas no tiene justificación científica. Debería hacerse, caso por caso, tal como está contemplado en el documento del MAGRAMA, aplicando los nuevos umbrales para la presión de pico y para la exposición.

5.4.2. Cálculo del impacto según las densidades de población

Otro modo de aplicación, más elaborado, que ya se utilizó en 1995 para el EsIA de la sísmica marina 3D de la costa Sur de California, consistió en realizar una estimación del número de individuos de cada especie de interés que previsiblemente resultará afectado con cada tipo de efecto. Para ello hay que hacer una estimación de la densidad media de individuos (unidades por km^2 o por km^3), que pueden considerarse como valores medios aplicables a toda la zona afectada o con valores diferentes para distintas celdas. Luego se cruza con la situación y extensión de las zonas en las que se superan los umbrales y se obtiene el resultado buscado. En el caso de California resultaba que podían verse afectadas 81 ballenas, pero si permanecían en la zona de trabajo podían verse afectadas varias veces. Este modo de aplicación también se usó para el EsIA de las maniobras militares con dispositivos antisubmarinos en las islas Hawái.

Una limitación del modo de aplicación anterior consiste en suponer que la densidad de animales permanece constante e igual a la existente antes de llevar a cabo el reconocimiento. Esta hipótesis es poco realista al menos para las especies que se encuentran presentes en un número muy limitado como suele ocurrir con los cetáceos. Un paso más se ha dado incorporando a los cálculos modelos de comportamiento animal (Houser, 2006). El modelo ESME (*Effects of Sound on the Marine Environment*) utiliza esta técnica. El control del modelo sobre el comportamiento de los animales es escalable dependiendo de la información disponible sobre la especie en cuestión. La localización se determina estocásticamente muestreando distribuciones de probabilidad de velocidades y direcciones de desplazamiento horizontal y vertical, tiempo entre salidas a la superficie y tiempos de estancia en el fondo.

5.4.3. Metodología de estudio

La metodología para un EsIA con el fin obtener la zona de afección asociada a la actuación o proyecto considerado de las fuentes de ruido para el área de vida marina puede ser la siguiente:

- Caracterización de la fuente de ruido.
- Conocimiento de la batimetría, composición del fondo, perfiles de temperatura y salinidad.
- Cálculo de la pérdida por transmisión, para determinar el nivel de presión sonora, según la batimetría o considerando varios escenarios.
- Cálculo de la zona de exclusión o el radio de seguridad de cada nivel de presión.
- Obtención del daño en función del umbral.
- Conocer la probabilidad, densidad y tipología de animales en la zona, según el radio de seguridad de cada nivel de presión.
- Medidas preventivas y correctoras.
- Estudio de riesgos, en función del proyecto, las fuentes de ruido y la fauna marina.

6. CONCLUSIONES

Es difícil predecir qué especies serán más vulnerables al ruido antrópico debido a la amplia gama de sensibilidades individuales y de población de las distintas especies, así como las diferencias en el comportamiento o la respuesta. Actualmente, sólo es posible hacer generalizaciones acerca de la vulnerabilidad de los grupos de especies basados en observaciones del comportamiento ante las respuestas a los sonidos producidos por el hombre, los hábitos y lo que se sabe acerca de la sensibilidad auditiva de una especie.

Al evaluar los impactos probables, se deben tener en cuenta las diferencias en las condiciones locales que pueden afectar a la propagación del sonido, como la profundidad, el tipo de fondo, el tamaño y el tipo de la fuente. La mayoría de los sonidos producidos por el hombre tiene cantidades significativas de energía en las frecuencias bajas, lo que conduce a la perturbación potencial, daños o interferencias en los misticetos. Hay pruebas de audición de baja frecuencia en los cachalotes, esta especie parece ser extremadamente sensible a las perturbaciones de una variedad de fuentes de sonido. Los odontocetos de grandes profundidades también pueden estar en riesgo ya que su comportamiento los pone en el canal de sonido profundo o de fijación de sonido SOFAR, a lo largo del cual el sonido viaja de manera eficiente a distancias de cientos a miles de kilómetros.

Sería conveniente que promotores y evaluadores dispongan de un modelo sencillo, que incluso puede consistir simplemente en una o varias fórmulas algebraicas. Los primeros, para usarlo al inicio de los trabajos del EsIA bajo hipótesis que aseguren que se está del lado de la seguridad; de esta forma se obtendrían desde el principio los límites de la zona potencialmente afectada y así podría delimitarse el ámbito geográfico de los restantes estudios (inventario ambiental, identificación de zonas protegidas, presencia de cetáceos, etc.); posteriormente, durante la redacción del EsIA, se aplicaría un modelo más aproximado para el estudio acústico. Los evaluadores, para poder hacer comprobaciones puntuales de los resultados de los estudios acústicos incluidos en los EsIA. Este modo de operar sería especialmente aconsejable cuando las fuentes de ruido emitan con niveles que no sean significativamente mayores que los umbrales admisibles de recepción, ya que en estos casos la zona potencialmente afectada será menor, pudiéndose incluir en la zona de protección contemplada en el programa de vigilancia.

La intensidad del sonido en el receptor (*RL*) se reduce por pérdida de transmisión (*TL*) cuando el sonido se desplaza desde la fuente (*SL*) al receptor: $RL = SL - TL$. El cálculo de TL se puede realizar con aproximaciones o mediante modelos numéricos. Con los dos modelos ejecutados, RAMGeo y BELLOP para la obtención de la pérdida por transmisión, se concluye que al incrementar la frecuencia considerada en cada modelo, disminuyen o aumentan respectivamente, las pérdidas por transmisión en el agua.

El cálculo de las zonas de exclusión presenta ventajas, desde un punto de vista operativo, pero aplicar tamaños fijos independientemente de la potencia de la fuente, del perfil de velocidades y de los grupos de especies, no tiene justificación científica. Debería hacerse, caso por caso, aplicando los umbrales para la presión de pico y la exposición.

Actualmente no existe en España ninguna norma legal que establezca umbrales cuantitativos de ruido subacuático como criterios de evaluación de impactos. Esta situación es bastante común y, aunque algunos países han establecido protocolos o directrices para minimizar los efectos adversos del ruido submarino generado por ciertas actividades, sólo se han localizado umbrales cuantitativos de ruido subacuático como criterios de evaluación de impactos en los EE.UU., en el Reino Unido y en Nueva Zelanda. En Dinamarca, para Groenlandia, existe un documento en el que se incluye una revisión actualizada de los criterios propuestos en estudios científicos y se define con gran detalle la información que debe presentarse como parte del EsIA.

7. BIBLIOGRAFÍA

ACAIMM//Advisory Committee on Acoustic Impacts on Marine Mammals (2006). *Report to the Marine Mammal Commission*.

Aparicio, J., García, E., Jiménez., A, Álvarez, F., y Ureña, J. (2010). Modelos de propagación de señales acústicas en entornos subacuáticos. *Gigatronic*, Mayo-Septiembre 2010, pp. 40-43.

Balcomb, K.C. III., y Claridge, D.E. (2001). A mass stranding of cetaceans caused by naval sonar in the Bahamas. *Bahamas Journal of Science*, 8(2): pp. 2-12.

Boebel, O., Breitzke, M., Burkhardt, E., y Bornemann, H. (2009). Strategic assessment of the risk posed to marine mammals by the use of airguns in the Antarctic Treaty area , Information Paper IP 51 , Agenda Item: CEP 8c, *Antarctic Treaty Consultative Meeting XXXII, Baltimore, USA*. hdl:10013/epic.32056

Bryant, P.J., Lafferty, C.M., y Lafferty, S.K. (1984). Reoccupation of Laguna Guerrero Negro, Baja California, Mexico, by gray whales. En M.L. Jones et al. (ed.), *The Gray Whale, Eschrichtius robustus*. Orlando, FL (EE UU): Academic Press.

Castellote, M. (2007). General review of protocols and guidelines for minimizing acoustic disturbance to marine mammals from seismic surveys. *Journal of International Wildlife Law & Policy*, 10:3-4, pp. 273-288.

CEI 651, Norma UNE 20464 (1990). Sonómetros. ICS: 17.140.50 / Electroacústica.

CHABA (1968). Proposed damage-risk criterion for impulse noise (Gunfire). *Report of working group 57. National Academy of sciences- National Research Council Committee on Hearing, Bioacusoustics and Biomechanics*.

Coates, R.F.W. (2001). *The Advanced SONAR Course*. Bradworthy (RU): Seiche.com Ltd.

David, A. (2011). Underwater Environmental Impact Assessment on Marine Mammals and Fish by High Power Anthropogenic Radiated Sound (Paper nº 27). *Proceedings of Acoustics, 2-4 November, Gold Coast, Australia*.

Dekeling, R.P.A., Tasker, M.L., Van der Graaf, A.J., Ainslie, M.A, Andersson, M.H., André, M., Borsani, J.F., Brensing, K., Castellote, M., Cronin, D., Dalen, J., Folegot, T., Leaper, R., Pajala, J., Redman, P., Robinson, S.P., Sigray, P., Sutton, G., Thomsen, F., Werner, S., Wittekind, D., y Young, J.V. (2014). *Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas*. Luxemburgo: European Commission/Publications Office of the European Union.

Department of Conservation (2013). *Code of Conduct for Minimising Acoustic Disturbance to Marine Mammals from Seismic Survey Operations*. Gobierno de Nueva Zelanda.

Duncan, A.J., y Maggi, A.L. (2006). A Consistent, User Friendly Interface for Running a Variety of Underwater Acous-

tic Propagation Codes. *Proceedings of ACOUSTICS 2006, Christchurch, New Zeland*. Disponible en https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AASNZ2006/papers/p29.pdf

Etter, P.C. (2013). *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*. CRC Press.

European Commission (2013). *Science for Environment Policy.* Future brief: Underwater Noise.

Evans, P.G.H. (1996). Human disturbance of cetaceans, pp. 279-299. En N. Dunstone y V. Taylor (eds.), *Exploitation of Mammals*. Londres (RU): Cambridge University Press.

Finneran, J.J., y Jenkins, A.K. (2012). *Criteria and Thresholds for U.S. Navy Acoustic and Explosive Effects Analysis*. San Diego, CA (EE UU): SSC Pacific.

Houser, D.S. (2006). A method for modeling marine mammals movement and behavior for environmental impact assessment. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 31(1): pp. 76-81.

Kraus, D. Underwater Acoustics. Disponible en http://homepages.hs-bremen.de/~krausd/iwss/UWA1.pdf

Medwin, H. (1975). Speed of sound in water: a simple equation for realistic parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 58, pp. 1318-19.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2011). *Prospecciones Sísmicas Marinas: Acuerdo de medidas de mitigación del efecto en los cetáceos de aguas españolas e identificación de áreas sensibles*. Disponible en http://www.magrama.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/actividades-humanas/contaminacion-acustica-marina/mitigacion-sismica.aspx

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2012). *Documento técnico sobre impactos y mitigación de la contaminación acústica marina*. Disponible en http://www.magrama.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/doc-tecnico-impactos-mitigacion-contaminacion-acustica-marina_tcm7-359854.pdf

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2014). *Manual de técnico de acústica pasiva para operaciones off-shore generadoras de ruido en aguas españolas*.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. *Conceptos básicos del ruido ambiental*. Disponible en http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/contaminacion_acustica_tcm7-1705.pdf

MMO (2015). *Modelled Mapping of Continuous Underwater Noise Generated by Activities. A report produced for the Marine Management Organisation* (MMO 1097).

NIOSH (1988). *Criteria for a recommended standard: Occupational Noise Exposure*. U.S. Department of Health and Human Services. National Institute for Occupational Safety and Health.

NMFS (2013). *Draft Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammals. Acoustic Threshold Levels for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts*. U.S. National Marine Fisheries Service (NMFS).

OGP (International Association of Oil & Gas Producers) (2008). *Fundamentals of Underwater Sound* (Report nº 406). Disponible en http://www.ogp.org.uk/pubs/406.pdf

Rendell, L.E., y Gordon, J.C.D. (1999). Vocal Response of Long-Finned Pilot Whales (*Globicephala Melas*) to Military Sonar in the Ligurian Sea. *Marine Mammal Science*, 15(1): pp. 198-204.

Richardson, W.J. (1995). Documented Disturbance Reactions (pp. 241-324). En W.J. Richardson, C.R. Greene, C.I. Malme y D.H. Thomson (eds.), *Marine Mammals and Noise*. San Diego, CA (EE UU): Academic Press.

Richardson, W.J., Fraker, M.A., Würsig, B., y Wells, R.S. (1985a). Behavior of Bowhead Whales, Balaena Mysticetus, Summering in the Beaufort Sea: Reactions to Industrial Activities. *Biological Conservation*, 32, pp. 195-230.

Richardson, W.J., Wells, R.S., y Würsig, B. (1985b). Disturbance Responses of Bowheads and Industrial Activity, (pp. 1980-84). En W.J. Richardson (ed.), *Behavior, disturbance responses and distribution of bowhead whales, Balaena mysticetus, in the eastern Beaufort Sea*, (ed.), pp. 1980-1984. OCS Study MMS 85-0034. LGL Ecological Research Associates Inc., Bryan, Texas (EE UU).

Rowles, T., Ketten, D., Ewing, R., Whaley, J., Bater, A., y Gentry, V. (2000). Mass Stranding of Multiple Cetacean Species in the Bahamas on March 15-17, 2000. *ANNEX J, Report of the Standing Working Group on Environmental Concerns SC/52/E28*.

SACLANT Undersea Research Centre (1998). *Bioacoustics Panel and Marine Mammal Environmental and Mitigation Procedures Panel*. A. D'Amico (ed.), NATO Undersea Research Centre, Italy, SACLANTCEN M-133.

Salon, S., Crise, A., Picco, P., de Marinis, E., y Gasparini, O. (2003). Sound Speed in the Mediterranean Sea: An Analysis from a Climatological Data Set, *Annales Geophysicae*, 21, pp. 833-846.

Schmidt, H. (1991). Numerical Modeling in Ocean Seismo-Acoustics. *Oceans 91 Proceedings of Ocean Technologies and Opportunities in the Pacific for the 90's, 1-3 October, Honolulu, Hawaii, USA*.

Southhall, B.L., Bowles, A.E., Ellison, W.T., Finneran, J.J., Gentry, R.L., Greene Jr., C.R., Kastak, D., Ketten, D.R., Miller, J.H., Nachtigall, P.E., Richardson, J.W., Thomas, J.A., y Tyack, P.L. (2007). Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals*, 33(4): pp. 1-121.

Wartzok, D., Watkins, W.A., Wursig, B., y Malme, C.I. (1989). *Movements and Behaviors of Bowhead Whales in Response to Repeated Exposures to Noises Associated with Industrial Activities in the Beaufort Sea*. Purdue University, Fort Wayne, Indiana (EE UU).

Watkins, W.A., Moore, K.E., y Tyack, P. (1985). Sperm Whale Acoustic Behaviors in the Southeast Caribbean. *Cetology*, 49: pp. 1-15.

WDCS (Whale and Dolphin Conservation Society), Simmonds, M., Dolman, S., Weilgart, L., (eds.) (2002). *Oceans of Noise*.

Weiss, R., (2001). Whales' Deaths Linked to Navy's Sonar Tests. *The Washington Post*, December 31: A8.

Wenz, G. M. (1962). Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(12): pp. 1936–1956.