

GESTIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA: ESTUDIOS DE IMPACTO ACÚSTICO SUBMARINO A TRAVÉS DE MODELIZACIONES

REFERENCIA PACS: 43.30.-Nb. Ruido en el agua; mecanismos de generación y características del campo

Pérez Gimeno, N.^{1,2}; Martínez Aragón, J.F.^{1,2}, Cueto Ancela, J.L.¹, Hernández Molina, R.¹

1. Institución: Laboratorio de Ingeniería Acústica de la Universidad de Cádiz.

Dirección: CASEM - Laboratorio de Ingeniería Acústica Campus Universitario de Puerto Real.

Población: Puerto Real, 11510. Cádiz

País: España

Tel./Fax: 956 01 60 51

E-mail: neus.perez@uca.es

2. Institución: Consultoría acústica "Servicios Acústicos".

Dirección: C/ San Alejandro, 17, Bajo A.

Población: Puerto Real, 11510. Cádiz

País: España

Tel./Fax: 956 92 48 85

E-mail: neus.perez@serviciosacusticos.es

ABSTRAC:

To manage the acoustic affection from a marine activity, the main objective of any underwater acoustic study is to evaluate the acoustic capacity and sensibility of an area.

A marine activity emission would generate acoustic disturbance in an existing background noise. The knowledge of oceanographic and bathymetric parameters, environmental noise, activity sound characterization, receiver's location as well as threshold levels are necessary for the completion of an underwater acoustic study developed through acoustic models.

This presentation describes general observations the development of an underwater acoustic study through acoustic models.

RESUMEN:

El objetivo de un estudio de impacto acústico submarino es evaluar la compatibilidad de una actividad con la capacidad acústica del área y su sensibilidad, para poder gestionar situaciones de afección.

La emisión de una actividad marina atañerá una perturbación en un entorno con ruido oceánico existente. Para el desarrollo de una evaluación de impacto acústico a través de modelizaciones será preciso conocer además de parámetros oceanográficos y batimétricos, la caracterización acústica del ruido ambiente y de la actividad a implantar así como presencia de receptores, umbrales de afección, etc.

Esta presentación propondrá las principales pautas para elaborar un estudio de impacto acústico submarino a través de modelizaciones

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de un Estudio de Impacto Acústico Submarino es evaluar la compatibilidad de una actividad con la capacidad acústica del área y su sensibilidad, y así poder gestionar situaciones de afección. La evaluación del alcance del impacto por ruido de una actividad, requiere por tanto, de la realización de una estimación de las emisiones acústicas y el análisis de los niveles de ruido que se producen en el entorno de los focos, de manera que se determinen las

superaciones o no de límites establecidos legislativamente. Actualmente, a nivel nacional en materia de ruidos se dispone de la Ley 37/2003 del Ruido y sus desarrollos, no obstante su aplicación se enfoca al medio terrestre, requiriendo de un establecimiento formal para el control real de la contaminación acústica marina. Por tanto, no existe en nuestro país ninguna norma legal que determine las actividades marinas sujetas a evaluación ni umbrales cuantitativos de ruido subacuático como criterios de evaluación de impactos¹.

A pesar de todo, en los últimos años la Administración está exigiendo a determinadas actividades marinas la realización de Estudios de Impacto Acústico Submarino a través de modelizaciones para establecer los niveles de presión sonora a diferentes distancias con tal de poder determinar áreas de protección y actuación.

A falta tanto de legislación concreta como de procedimientos o metodología estandarizada, los consultores a la hora de realizar un Estudio de Impacto Acústico pueden respaldarse tanto en el Documento Técnico realizado en el 2012 por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA)² como en el Informe Específico del 2015 del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)¹. Otras herramientas legislativas a tener en cuenta en materia de contaminación acústica marina son la Ley 41/2010 de Protección del Medio Marino, la Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y la Biodiversidad y la Ley 9/2006 de Evaluación de Impacto Ambiental. Además, a nivel internacional, este tipo de contaminación se encuentra contemplada en diversos instrumentos normativos y resoluciones procedentes de diferentes instituciones, así como en convenios de gestión y conservación del medio marino (OSPAR³, ACCOBAMS⁴, ASCOBANS⁵, CBI⁶, etc.)

Actividades Sujetas a Estudios de Impacto Acústico Submarino:

No existe un listado oficial que determine aquellas actividades sujetas a Estudios de Impacto Acústico, sin embargo en el Documento Técnico del MAGRAMA² clasifican distintas actividades generadoras de contaminación acústica marina, donde se recomienda la implantación de medidas de mitigación y, consecuentemente susceptibles a quedar sometidas a procedimientos de evaluación de impacto acústico. Dichas actividades se resumen a continuación:

- Sónares y detonaciones militares: Ejercicios navales y sónares militares tácticos (principalmente el sónar activo de frecuencias bajas, medias y alta intensidad)
- Exploración y explotación de hidrocarburos: Engloban las campañas sísmicas para el conocimiento de las estructuras geológicas del subsuelo marino (exploración), la perforación del fondo marino, instalación de la estructura de explotación y su desmantelamiento.
- Construcciones: anclado de pilotes para diversas infraestructuras (aerogeneradores, pantalanés, etc.), dragados, explosiones (para romper sustratos, desinstalación de plataformas, etc.) y funcionamiento de parques eólicos marinos.
- Tráfico marítimo fundamentalmente de grandes buques
- Dispositivos de evitación acústica: instrumentos acústicos que alertan o ahuyentan con sonidos a animales marinos con tal de que eviten las artes de pesca o jaulas de maricultura.
- Investigación: las actividades de investigación que incluyen el uso de instrumentos acústicos incluso de alta intensidad (seguimiento de equipos, localización, etc.)

Objetivo de esta comunicación:

A lo largo de este artículo se presenta una revisión de los aspectos más relevantes que deben incluirse o tratarse a la hora de realizar un Estudio de Impacto Acústico Submarino.

OBJETIVO DE LOS ESTUDIOS DE IMPACTO ACÚSTICO SUBMARINOS:

Los Estudios de Impacto Acústico tratan de conocer los niveles de presión e intensidad con el fin de determinar su posible afección. De manera que a partir de los resultados de una modelización permitan calcular el valor de indicadores concretos (como SPL_{RMS} , SPL_{o-p} o SEL), cuya superación puede relacionarse con determinados umbrales de afección. No obstante, a la hora de establecer los criterios de evaluación se precisará adaptar las variables y umbrales según cada tipo de fuente (impulsiva, impulsiva repetida o continua)¹.

En general, estos estudios surgen para dar respuesta a requisitos administrativos ya que el MAGRAMA puede exigir que se incluya en los EsIA, una modelización acústica para estimar el impacto del ruido sobre mamíferos marinos y otras especies (especies de interés comercial, tortugas, etc.). Solicitando que se *“calculen los niveles de presión sonora a diferentes distancias con tal de permitir realizar una predicción de la extensión superficial de los potenciales impactos”*, y/o presentando los resultados de determinados indicadores (SPL_{o-p} , SPL_{RMS} , SEL, SEL_{24h} , etc.). Solicitando en todos los casos la justificación de las fuentes de ruido consideradas, descripción tanto de los niveles de presión sonora utilizados como de las especies marinas bajo estudio, características y premisas realizadas para ejecutar el modelo, rangos de afección, resultados y conclusiones (contenidos mínimos de los estudios)

Concretamente, una de las aplicaciones para el MAGRAMA de los criterios de evaluación es la de identificar zonas de exclusión y de seguridad, determinando las áreas donde los umbrales son sobrepasados. En estas zonas y en función de la actividad, se proponen medidas de mitigación tales como las propuestas en el Documento Técnico².

Por tanto para realizar cualquier Estudio de Impacto Acústico Submarino el consultor, por un lado, deberá seleccionar, describir y justificar la metodología de los cálculos (modelo), así como establecer los índices o parámetros adecuados para determinar los umbrales de afección según especies y actividad. Y por el otro, resolver las condiciones iniciales, es decir conocer además de parámetros oceanográficos y batimétricos, la caracterización acústica de la emisión (actividad a implantar), del ruido ambiente, la presencia de receptores, etc.

3. MODELOS DE PROPAGACIÓN DE RUIDO APLICABLES A ESTUDIOS DE IMPACTO ACÚSTICO

Existen numerosos modelos disponibles^{1,7} para predecir la propagación acústica en el medio marino. Cada uno de ellos posee sus propias ventajas e inconvenientes respecto a los datos de entrada y los métodos de cálculo, pero todos dependen de la descripción del perfil de velocidad del sonido en la columna de agua y los parámetros que caracterizan la emisión inicial. Por ello, previa a la descripción de las diferentes alternativas de modelos de cálculo de la propagación, se exponen los inconvenientes generados por la falta de información con la que el consultor deberá enfrentarse a la hora de efectuar el Estudio de Impacto Acústico Submarino, y que afectará a los resultados de cualquier modelo:

Velocidad del sonido.

La velocidad del sonido se establece a través de los perfiles de temperatura y salinidad en la columna de agua en el área de estudio pero habitualmente en España no se toman estos perfiles durante el EIA, por lo que el consultor debe buscar otras fuentes de información. Existen bases de datos oceanográficos públicas (*mapserver* del IEO, *National Oceanographic Data Center* del NOAA, etc.), sin embargo esta información se restringe a determinados meses, años y/o puntos (ver figura 1). Y aunque durante el periodo de la actividad a evaluar las condiciones oceanográficas variarán en cada punto o de un día para otro, debido a la calidad y cantidad de los datos al que el consultor puede acceder, a la hora de determinar la velocidad del sonido precisará considerar que las condiciones oceanográficas mantienen un único patrón estacional a lo largo de grandes áreas; empleándose, generalmente, un promedio de los datos

extraídos de los perfiles disponibles. Esta falta de datos de entrada de los modelos repercute en la estimación de la velocidad del sonido, consecuentemente en los cálculos de su propagación y cualquier otro resultado.

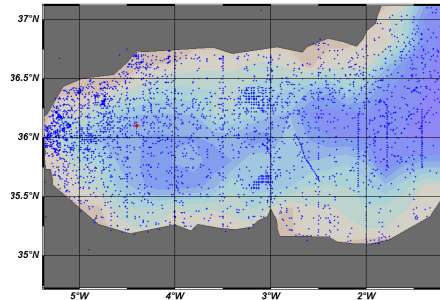


Figura 1. Puntos con perfiles de temperatura y salinidad de las campañas oceanográficas realizadas desde 1987 en el Mar de Alborán (NOAA, www.nodc.noaa.gov)

Emisión inicial (condiciones de frontera).

Para aquellas actividades cuya emisión acústica es controlada, tales como airguns (geosísmica marina) o sónares, se puede acceder a una descripción detallada: niveles de potencia de emisión y forma de la onda (espectros direccionales en planta y en alzado).

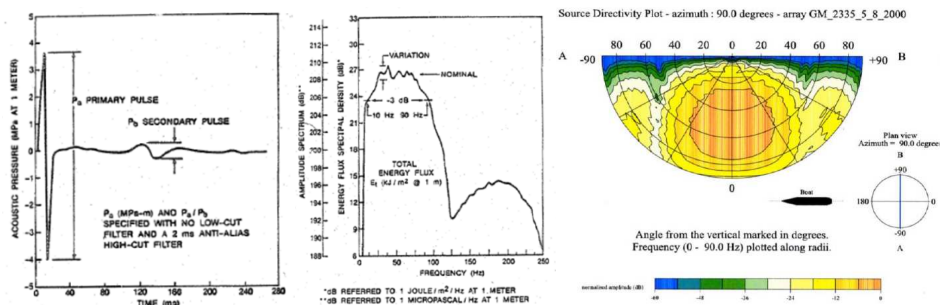


Figura 2. Ejemplo de la información aportada de emisión de una geosísmica marina: Izqda. presión acústica instantánea en función del tiempo; Centro: densidad espectral del flujo de energía; Dcha. espectro direccional en alzado (Fte. CEDEX¹).

Sin embargo, para otro tipo de actividades generadoras de ruido que emplean conjuntos de maquinaria y presentan diferentes fases de trabajos, como pueden ser las perforaciones del suelo marino, la explotación de hidrocarburos, etc., prácticamente no se dispone de información de dichas emisiones acústicas. Ello es debido ya sea a la falta de datos, o a la privacidad a la hora de compartir determinada información o a restricciones propias de los ensayos de los trabajos en el mar; limitándose los datos a escasas recopilaciones bibliográficas que ofrecen valores de niveles globales genéricos.

	Niveles de ruido en la fuente (dB re 1μPa/m)					
Frecuencias centrales	50	100	200	500	1000	2000
Kulluck - Barco de Perforación	174	172	176	176	168	-
Kioriak - Barco de apoyo	162	174	170	166	164	159

Tabla 1. Ejemplo de la información disponible de actividades de barcos perforadores (Richardson 1995⁸)

Modelos de Propagación del Sonido.

Existe una amplísima colección de modelos de propagación que a grandes rasgos se pueden clasificar según métodos físicos y métodos matemáticos.

Los modelos físicos (generalmente denominados modelos de flujo de energía) se enfocan en la variación de la intensidad del sonido; manteniendo el principio de la conservación de la energía, determinan la propagación del sonido considerando los diferentes factores de pérdidas energéticas (divergencia, absorción, etc.) y las repercusiones como consecuencia de las variaciones en la velocidad del sonido y la Ley de Snell.

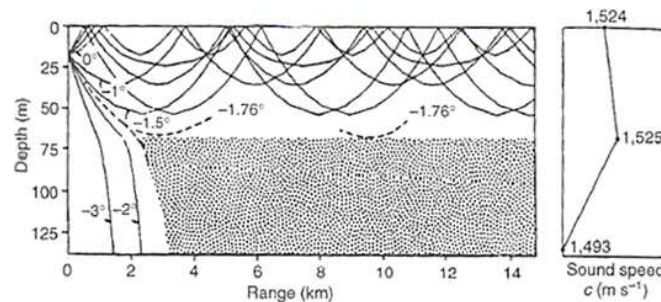


Figura 3. Ejemplo método físico. Diagrama de líneas de una fuente sonora localizada a una profundidad de 16 m. Propagación del sonido según el perfil de velocidad del sonido mostrado a la derecha (Etter⁷).

Los modelos matemáticos se fundamentan en la resolución de la ecuación de onda, siendo preciso el empleo de métodos numéricos. Resolver la ecuación para todo el rango de variación de las variables es imposible, por tanto, en función de la técnica de resolución empleada el modelo será aplicable a un determinado conjunto de problemas. A modo de resumen se presentan estos modelos que, a su vez, pueden clasificarse según la técnica utilizada (ver figura 4)

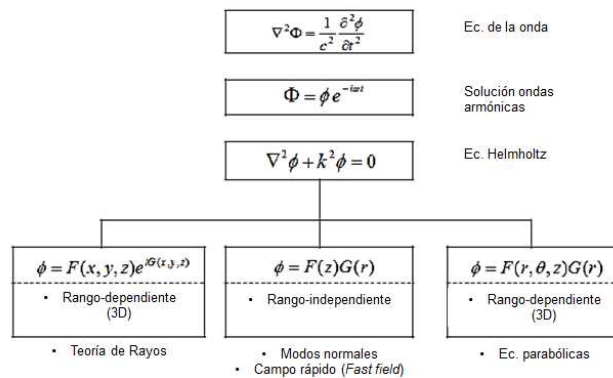


Figura 4. Resumen de las aproximaciones teóricas para la modelización de la propagación a través de modelos matemáticos (Etter⁷).

Como se ha comentado, existe una gran colección de modelos con sus limitaciones, adaptaciones y recomendaciones con lo que en función del estudio a realizar serán más apropiados unos que otros. El Informe Específico¹ del CEDEX resumen los criterios de aplicabilidad de los modelos tal y como se muestra en la tabla 2:

Tipo de modelo	DOMINIO DE APLICABILIDAD							
	Aguas someras (< 200 m)				Aguas profundas (> 200 m)			
	Frecuencias bajas (< 500 Hz)		Frecuencias altas (> 500 Hz)		Frecuencias bajas (< 500 Hz)		Frecuencias altas (> 500 Hz)	
	Indep. de r	Dep. de r	Indep. de r	Dep. de r	Indep. de r	Dep. de r	Indep. de r	Dep. de r
Rayos	-	-	+	++	+	+	++	++
Modos normales	++	+	++	+	++	+	+	-
Campo rápido	++	+	++	+	++	+	+	+
Parabólicos	+	++	-	-	+	++	+	+

"++": el modelo es tanto aplicable (hipótesis aceptables) como práctico (coste computacional razonable).
 "+": el modelo falla en uno de los dos aspectos anteriores.
 "-": el modelo no es ni aplicable ni práctico.

Tabla 2. Resumen de la aplicabilidad de las distintas clases de modelos a los estudios de impacto ambiental^{1,7}

Aplicación de un determinado modelo de propagación del sonido para un Estudio de Impacto Acústico Submarino.

En nuestro caso, el modelo de diseño propio empleado en varios Estudios de Impacto Acústico, concretamente para determinar la afección acústica de trabajos geosísmicos, se catalogaría dentro de métodos físicos o de flujo de energía. Los elementos que se incorporan en los cálculos e intervienen en la propagación son:

- La velocidad del sonido: determinada en función de las curvas de temperatura y salinidad.
- Modificaciones debido a las refracciones continuas de la onda sonora causadas por la variación de la velocidad y la Ley de Snell.
- Pérdidas por divergencia geométrica.
- Factores de atenuación y absorción en el desplazamiento de la onda.
- Efectos de reflexión y refracción en superficie y fondo marino, así como la interacción entre las diferentes señales (señal directa, indirecta y aportación de otros emisores)

A grandes rasgos, la forma inicial de la onda la establece el punto de partida de emisión, direccionalidad y distribución frecuencial de la intensidad. El frente de ondas se desplaza según el ángulo en el que incide, de manera que la propagación de la onda se modifica conforme los ángulos que adopta. El modelo calcula la variación de la forma del frente de ondas según su propagación tanto en profundidad como conforme se aleja en el plano horizontal. Según sea el perfil de velocidades la emisión puede variar de una propagación esférica a una casi cilíndrica (ver figura 7). La evolución del frente de ondas se calcula a través de un proceso iterativo de cálculo numérico: dado un transecto (plano r - z) se calcula para un intervalo de ángulo inicial ($\Delta\theta$) comprendido entre θ_1 y θ_2 , la evolución del arco (Δs). Esta evolución se obtiene para pequeños incrementos de la profundidad (Δz) suficientemente pequeños como para considerar, en estos tramos, el gradiente de velocidad constante, lo que permite calcular la pérdida por divergencia geométrica.

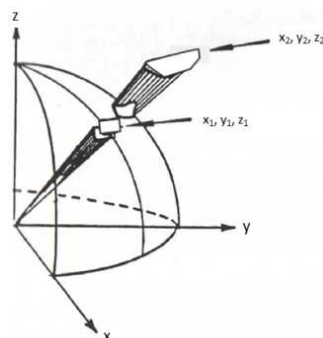


Figura 5. Esquema de la propagación del frente de ondas.

Como se ha comentado, durante los estudios acústicos el consultor no dispone de una completa información para la realización de los cálculos de la propagación del sonido, con lo

que en todo momento se emplea el valor mayorado para estar del lado de la seguridad (punto de vista más conservador). De manera que por ejemplo, en caso de no conocer el periodo de ejecución de la actividad o de datos actualizados, se seleccionan los parámetros oceanográficos que propicien una propagación favorable, o al no tener la caracterización de la fuente, se reemplazan los datos por la de otro sistema parecido cuya potencia de emisión no sea inferior.

4. RUIDO AMBIENTE

A pesar que la contribución del ruido ambiente no siempre es relevante en los niveles de presión sonora finales, la descripción del ruido ambiente del área de estudio suele ser un requisito especificado en las exigencias Administrativas para integrarlo dentro de los cálculos.

En la Directiva 2008/56/CE establece como una de las prioridades el determinar para cada región o subregión marina un conjunto de características correspondientes a un buen estado ambiental, entre las que se encuentra el Descriptor 11 (Ruido). Para su evaluación proponen indicadores de presión medidos de manera que representen las situaciones promedios anuales. Por tanto, aunque se han activado diversos proyectos que darán respuesta a esta necesidad, uno de los mayores inconvenientes a la hora de asignar o estimar el ruido de fondo presente en las áreas de estudio es que son pocos los estudios de ruido ambiente marino realizados en nuestras aguas, siendo necesario considerar la aportación del ruido de fondo al área teóricamente.

Desde un punto de vista teórico, las curvas de Wenz⁹ son utilizadas como modelos predictivos para los niveles de ruido de fuentes no identificables y, por tanto, en los niveles de ruido de fondo. No obstante, existen otras publicaciones recientes con medidas de largas series temporales como es la de Castellote¹⁰ donde describe las medidas de ruido de fondo realizadas en tres zonas de la costa española.

Por otro lado, aunque no se hace referencia en ninguno de los documentos oficiales^{1,2}, se debería considerar que la afección del sonido sobre una determinada área repercutirá en mayor o menor grado en función del estado de ruido ambiental (calidad acústica) del área. Es decir, es de esperar que la afección de la emisión de una actividad varíe en función del ambiente sonoro del área (por ejemplo el Estrecho de Gibraltar o cerca de las Islas Columbretes los escenarios acústicos son completamente diferentes¹⁰).

5. UMBRALES DE RUIDO PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

Actualmente no existen conclusiones definitivas sobre la métrica más adecuada para expresar los diferentes efectos sobre cada grupo de especies, cuan menos sobre los umbrales de ruido correspondientes. Con lo que el consultor debe establecer los criterios de impacto acústico a través de una revisión bibliográfica, determinando los parámetros y/o rangos cuantificables de afección. Concretamente, en ambos documentos oficiales^{1,2} se presentan recopilaciones de parámetros, umbrales y funciones de ponderación que pueden ser adoptados.

No obstante, no se especifica el intervalo de tiempo por el que hay que dividir o promediar la energía de una señal o ciclo para calcular los parámetros (ya sea el valor RMS o niveles de exposición), generando con ello confusión a la hora de aplicar estos criterios. La amplitud, duración, frecuencia y evolución temporal de la exposición al ruido influyen en la evaluación de los efectos y en concreto al establecer en el grado de TS (Threshold shift o "umbral de daño")¹

En este aspecto, en 2013 NMFS¹¹ publicó un borrador exponiendo nuevas propuestas para las evaluaciones de efectos TS sobre los mamíferos marinos, estableciendo un doble criterio: un

umbral para la presión de pico (SPL_{0-p}) y otro para la energía acumulada (SEL_{cum}) según si trata de ruido impulsivo o no impulsivo; planteando además, funciones de ponderación calculadas con el SEL_{cum} . Por ello, en la recopilación realizada por el CEDEX¹ se incluye este nuevo enfoque proponiendo para la determinación de la zona de exclusión, la aplicación de estos umbrales de presión de pico y exposición, en vez de los presentados en el Documento del MAGRAMA² para la densidad de potencia equivalente o la presión RMS.

Ante estas incertidumbres para establecer los criterios de evaluación el consultor debe mantener el principio de conservación, debiendo proporcionar un margen de seguridad adicional.

6. CONCLUSIONES

Es indiscutible la importancia de realizar Estudios de Impacto Acústico Submarinos con tal de poder gestionar los posibles impactos acústicos procurando minimizar sus efectos.

Considerando que se selecciona adecuadamente la metodología y se ejecutan correctamente los cálculos para la modelización de la propagación, todavía queda pendiente, a la hora de realizar un Estudio de Impacto Acústico Submarino determinar umbrales apropiados según especies, identificar la calidad acústica de las áreas o ruido ambiente, entre otros. Por ello y dado que normalmente la calidad de la información con la que se parte es escasa, se recalca la necesidad de enfocar los esfuerzos en avanzar, especificar y aportar datos e información relevantes a la hora de realizar cualquier modelización de la propagación del sonido.

Todo ello no invalida los trabajos realizados hasta la fecha ya que desde el punto de vista de gestión de la contaminación acústica y conservación del medio marino, en general las evaluaciones efectuadas presentan escenarios acústicamente más desfavorables que los esperados ya que los estudios han mantenido el principio de conservación, empleando criterios acústicamente más desfavorables y/o valores mayorados para estar del lado de la seguridad.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Mayo 2015. Informe Específico del Estado Actual del Conocimiento sobre Fuentes, Efectos y Modelos de Propagación del Ruido Subacuático Generado por los Trabajos de Geosísmica Marina en relación con los Procedimientos de Evaluación Ambiental (A6-T1-CA-3). 173 pp.
2. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2012). Documento técnico sobre impactos y mitigación de la contaminación acústica marina. Madrid. 146 pp.
3. Convenio OSPAR para la protección del Medio Ambiente Marino del Atlántico del Nordeste.
4. Acuerdo ACCOBAMS sobre la conservación de los cetáceos del mar Negro, el mar Mediterráneo y el Área Atlántica Vecina.
5. Acuerdo ASCOBANS para la conservación de los pequeños cetáceos del mar Báltico, el Nordeste Atlántico, el mar de Irlanda y el mar del Norte.
6. CBI: Comisión Ballenera Internacional.
7. Etter, P.C. 2013. "Underwater acoustic modeling and simulation".
8. Richardson, W.J., Greene, C.R., Malme C.I., y Thompson D.H. 1995. "Marine mammals and noise". Academic Press, San Diego.
9. Wenz, G.M. 1962. "Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources" Journal of the Acoustic Society of America 34: 1936- 1956.
10. Castellote M (2010) Patrón migratorio, identidad poblacional e impacto del ruido en la comunicación del rorcual común (*Balaenoptera physalus* L. 1758) en el Mar Mediterráneo Occidental. 250 p.
11. (2013) NMFS "Draft Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammals. Acoustic Threshold Levels for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts.