

Modelización ambiental de la fuente para mitigar el impacto sobre la vida marina

Alex Goertz,^{1*} Jens Fredrik Wisløff¹, Francis Drossaert¹ y Jaafar Ali¹ discuten cómo se puede utilizar la modelización de la salida de la fuente de arreglos marinos de pistolas de aire para planificar las medidas de mitigación para los mamíferos marinos como parte del diseño de una prospección sísmica y de la concesión de permisos medioambientales.

Las señales de impulsión emitidas por las pistolas de aire sísmicas son unas de las muchas fuentes de ruido antrópico de los océanos. Las preocupaciones acerca de los potenciales efectos adversos del ruido antrópico sobre la vida marina han existido desde la década de 1970 y, desde entonces, han desencadenado que los legisladores impongan requisitos de mitigación en muchas jurisdicciones de todo el mundo. Dichas medidas de mitigación pueden incluir la definición de zonas de exclusión alrededor de áreas sensibles o el despliegue de observadores de mamíferos marinos (MMO, por sus siglas en inglés). Algunas veces, también son necesarias las denominadas mediciones de verificación de las fuentes de sonido para monitorizar los niveles sonoros en áreas específicas. En este artículo describimos cómo la modelización iterativa precisa de las firmas de campo lejano emitidas desde los arreglos de pistolas de aire se puede utilizar para estimar el nivel sonoro de una fuente sísmica marina como una función de la distancia. Los resultados obtenidos a partir de esta modelización se pueden utilizar para diversas medidas de mitigación. Éstas pueden incluir la planificación de zonas de exclusión alrededor de áreas sensibles, un radio de seguridad alrededor de los buques fuente sísmicos para la planificación del despliegue de MMO, así como la planificación de los denominados procedimientos de arranque suave, es decir, el proceso de aumentar la salida de un arreglo de pistolas de aire añadiendo gradualmente pistolas individuales a lo largo de una secuencia de disparos.

El modelo que empleamos para describir la firma de presión de una pistola de aire se basa en la teoría de una burbuja esférica oscilante, que formularon por primera vez Kirkwood y Bethe (1942). Herring (1949) y Gilmore (1952) proporcionaron las expresiones de una ecuación de movimiento para describir la expansión y retracción de la pared de la burbuja. Ziolkowski (1970) presentó un método para el cálculo progresivo de los pulsos de presión de las pistolas de aire utilizando esta teoría. En la década de 1980 y a principios de la de 1990, se realizó una amplia investigación con una serie de pruebas para seguir refinando el modelo y aplicar el método para diseñar arreglos de pistolas de aire con una salida óptima de

la fuente (p.ej., Laws et al., 1990; Langhammer, 1994; Landro, 1992; Strandenes y Vaage, 1992). Parkes y Hatton (1986) y Dragoset (1990, 2000) ofrecen otras ideas generales.

En este artículo, describiremos primero la salida de la fuente en el dominio de la frecuencia en relación con los niveles de ruido ambiental del océano y la precisión de la modelización a lo largo de ese rango de frecuencias. Abordaremos los indicadores típicos para cuantificar la fuerza de una fuente de ruido subacuático tal como se usan en los marcos regulatorios actuales. Presentamos un flujo de trabajo para obtener una medida de la fuerza de la fuente en la banda de frecuencias relevante para los mamíferos marinos a partir de las firmas de las pistolas de aire modelizadas iterativamente. Mostramos cómo se puede aplicar el flujo de trabajo al cálculo del radio de seguridad y de las zonas de exclusión, así como a la estimación de los efectos acumulados y a la planificación de procedimientos de arranque.

El espectro de una pistola de aire

Las pistolas de aire se diseñaron originalmente para proporcionar un brusco pulso de presión de frecuencia relativamente amplia. Además del pulso inicial de presión que se crea cuando se libera el aire de la cámara, se crean pulsos adicionales por la oscilación de la burbuja de aire después de que haya sido liberada. Dado que el periodo de la oscilación de la burbuja es proporcional a la raíz cúbica del volumen (p.ej., Dragoset, 2000), la combinación de pistolas de aire con diferentes volúmenes en un arreglo da lugar a la supresión de los pulsos oscilantes de la burbuja por la superposición de las firmas individuales de las pistolas con diferentes volúmenes. Normalmente, el pulso de presión inicial viene seguido de la reflexión de la superficie marina, o fantasma, que es una réplica negativa de la firma de la pistola de aire con un retardo que depende de la profundidad de la pistola de aire. Para los fines de este artículo, estamos interesados en el espectro de las pistolas de aire y de los arreglos de pistolas de aire en comparación con el ruido acústico ambiental. Esto se muestra en la Figura 1, donde comparamos los espectros de señal y ruido medidos a partir de pruebas de calibración de pistolas

¹ *Petroleum Geo-Services.*

* *Correo electrónico del autor de contacto: alexander.goertz@pgs.com*

Sísmica marina

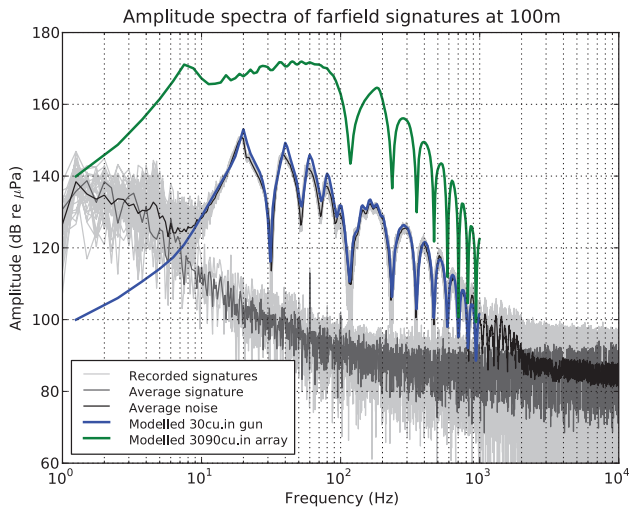
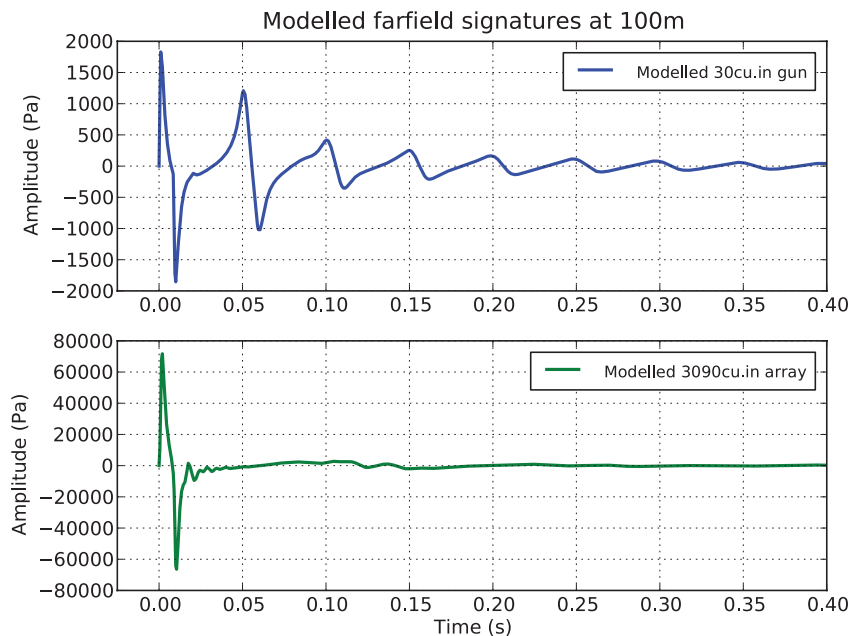


Figura 1 Las líneas grises muestran los espectros de señal y ruido medidos a partir de una secuencia de disparos para una pistola de 30 pulgadas cúbicas bajo condiciones silenciosas en un fiordo noruego profundo. Las líneas negras son el promedio de todos los disparos individuales. La línea azul muestra el espectro de una firma modelizada. La línea verde muestra el espectro modelizado para un arreglo de 3090 pulgadas cúbicas.

de alta resolución realizadas en un fiordo noruego profundo (Mattson et al., 2012). Se midieron datos de una pistola de aire individual de 30 pulgadas cúbicas (líneas grises y negras) a 100 m bajo la superficie y muestran una señal por encima del nivel de ruido ambiental de entre 8 y 2000 Hz. La pistola de aire se situó a una profundidad de 6,35 m. Observamos que la firma modelizada (azul) se ajusta muy bien con los datos medidos hasta 1 kHz. La modelización se realizó a una tasa de muestreo de 0,5 m/s, por lo que el espectro termina a 1 kHz. El ruido acústico ambiental se midió utilizando el mismo hidrófono justo antes de la secuencia de disparos.

Figure 2 Firmas modelizadas en el dominio del tiempo de los espectros que se muestran en la Figura 1. Parte superior: pistola de aire individual de 30 pulgadas cúbicas a una profundidad de 6,35 m. Parte inferior: arreglo de 3090 pulgadas cúbicas a la misma profundidad. Ambas firmas se modelizan a 100 m verticalmente bajo el arreglo. Observe la diferencia de escala de 40 veces del eje vertical entre los dos gráficos.



El ruido de fondo es de unos 90 dB, representando condiciones muy silenciosas dentro del fiordo, y aumenta hacia las bajas frecuencias debido al ruido de la marea y el oleaje. Una curva en el espectro promedio de la señal (negro) a 2000 Hz indica dónde ha caído la señal por debajo del nivel de ruido ambiental. El espectro modelizado para un arreglo de pistolas de aire de 3090 pulgadas cúbicas a la misma distancia de 100 m (verde) muestra un espectro más plano por debajo de los 100 Hz debido a la supresión del pulso de las burbujas. El nivel de ruido ambiental se alcanza a frecuencias más altas debido a la salida generalmente mayor del arreglo en comparación con una única pistola. Es difícil evaluar cuantitativamente los niveles de la señal en relación con el ruido de fondo por encima de 1 kHz porque no hay disponibles mediciones del arreglo de altas frecuencias y el modelo no incluye frecuencias por encima de 1 kHz.

No obstante, observamos un decaimiento más pronunciado del espectro del arreglo en comparación con la pistola individual de 30 pulgadas cúbicas entre 20 y 1000 Hz. Los efectos de altas frecuencias observados en los datos de un arreglo más pequeño de fuentes lineales se abordan en Landro et al. (2011). Diferentes efectos físicos a altas frecuencias se manifestarían por un cambio en la pendiente del decaimiento de las altas frecuencias. La Figura 2 muestra las firmas modelizadas correspondientes en el dominio del tiempo para la pistola individual de 30 pulgadas cúbicas (azul) y para el arreglo de pistolas de 3090 pulgadas cúbicas (verde).

Medición de los niveles de exposición de los mamíferos

Normalmente, la energía de la señal es el mejor modo de cuantificar la fuerza de una fuente a la cual está expuesta

la vida marina. Sin embargo, en el pasado se han utilizado varias medidas y terminologías - a veces confusas y opuestas - para su cuantificación. Además, a menudo es difícil identificar la contribución de una fuente sonora individual en presencia de un sinfín de otras fuentes sonoras (la mayoría de ellas consideradas ruido en este contexto), especialmente para fuentes de sonido estacionario embebidas en una señal de fondo no estacionaria. Aquí describiremos las dos medidas más populares que se definen sin ambigüedades y que son ampliamente aplicables a varias fuentes sonoras. Se trata del nivel de presión RMS (SPL_{RMS} , por sus siglas en inglés) y el nivel de exposición sonora (SEL, por sus siglas en inglés). El nivel de presión RMS es una medida de la amplitud cuadrática media (RMS, por sus siglas en inglés) de la señal en una ventana temporal elegida, en términos matemáticos:

$$SPL_{RMS} = 20 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{1}{T} \int P(t)^2 dt} \right)$$

La letra P representa la presión medida en μPa . El nivel de presión RMS se da en unidades de decibelios (dB) en relación con 1 μPa . El nivel de presión RMS puede ser engañoso si la amplitud de la señal varía fuertemente a través de la ventana temporal elegida. Una medida mejor para las señales transitorias es el nivel de exposición sonora (SEL), ya que mide la energía de la señal en una ventana específica menos el ruido de fondo fuera de esa ventana:

$$SEL = 10 \log_{10} \left(\int_0^T P(t)^2 dt - \int_n^{n+T} P_n(t)^2 dt \right)$$

Normalmente la ventana temporal se elige de modo que sea el tiempo que comprende del 5% al 95% de la energía acumulada. La ventana de ruido normalmente es una ventana temporal que precede a la señal.

Además de definir una medida inequívoca de la amplitud y la energía de la señal sonora, es necesario definir la susceptibilidad de los mamíferos marinos a dichas señales en términos físicos. Sin entrar en detalles biológicos acerca de los posibles efectos conductuales y fisiológicos del sonido, los mamíferos marinos (excluidos los pinnípedos en el exterior) generalmente se pueden dividir en cuatro grupos con audición funcional diferente (Southall et al., 2007). Esos grupos de audición funcional se definen por la banda de frecuencias en el que las especies de cada grupo son más susceptibles a la exposición al sonido y, por tanto, tienen mayor probabilidad de mostrar signos de reacción conductual o efectos fisiológicos. La Figura 3 muestra la respuesta de frecuencia de los filtros de paso de banda que representan los diferentes grupos de audición funcional definidos por Southall et al. (2007). Para hacer una representación realista del nivel sonoro al que está expuesto un mamífero marino, cualquier señal se debería filtrar en consecuencia antes de calcular los valores SEL. Observe que sólo el corte inferior de esos filtros es relevante para el rango de frecuencias de la sísmica de exploración.

Flujo de trabajo de modelización ambiental

Hemos desarrollado un flujo de trabajo para llegar a estimaciones de las exposiciones sonoras en función de la localización que se puede utilizar eficazmente para planificar las medidas de mitigación. A partir de ahora, nos referiremos a este flujo de trabajo como “modelización ambiental”. El flujo de trabajo se implementa en el software Nucleus y consiste en los siguientes pasos:

- Modelización de las firmas de campo lejano de la fuente incluyendo las interacciones de las pistolas de aire de corto alcance, los efectos de los fantasmas y la direccionalidad del arreglo.

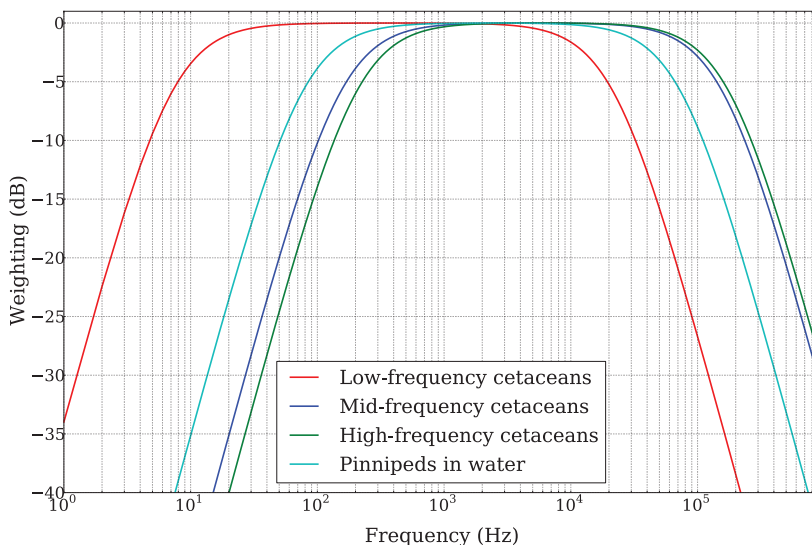


Figura 3 Filtros de paso de banda (filtros M) que definen los diferentes grupos de audición funcional (reproducida de Southall et al., 2007).

Sísmica marina

- Cálculo de la propagación geométrica y los efectos intrínsecos de atenuación.
- Filtrado de las firmas con la propagación corregida con un filtro de paso de banda que representa el grupo de audición funcional deseado (Southall et al., 2007).
- Cálculo del nivel de presión RMS o SEL según las ecuaciones 1 y 2.
- Representación del atributo en vista de mapa o como una función de la distancia.

Los pasos individuales del flujo de trabajo se muestran en la Figura 4. La rutina de modelización de la fuente proporciona la firma de campo lejano en el dominio del tiempo de un arreglo de pistolas de aire como una función del ángulo y la distancia. Esta firma se multiplica por un término analítico de propagación geométrica que puede definir el usuario en una escala deslizante entre propagación cilíndrica y esférica. Conforme la onda de presión se propaga desde la fuente, inicialmente se propagará igualmente en todas las direcciones produciendo una propagación esférica con una pérdida de 20 dB por década. La interacción del fondo marino reflejará de vuelta una cantidad creciente de energía

conforme aumente el ángulo de incidencia, dando como resultado que en las mayores distancias esté gobernada por la propagación cilíndrica, correspondiente a un decaimiento de 10 dB por década. En realidad, la propagación geométrica también dependerá de las variaciones de la velocidad del sonido, las propiedades del fondo marino y la batimetría. En muchos casos típicos, la propagación esférica es una aproximación válida hasta distancias de 1,5 veces la profundidad del agua, mientras que la propagación cilíndrica a veces puede ser una buena aproximación de primer orden para distancias más allá de varias veces la profundidad del agua (Urban, 2000).

A grandes distancias y para una propagación casi horizontal, la amplitud de la onda sonora que se propaga será mucho menor debido a la interferencia destructiva de la onda directa y del fantasma de la fuente. Este efecto, denominado espejo de Lloyd (p.ej., Jensen et al., 2000), bajo circunstancias perfectas (coeficiente de reflexión de -1) aportará 20 dB adicionales de pérdida de amplitud por década a lo largo de una trayectoria horizontal. El patrón de radiación resultante, mostrado en la Figura 5, ilustra cómo la mayoría de la energía se dirige dentro del suelo.

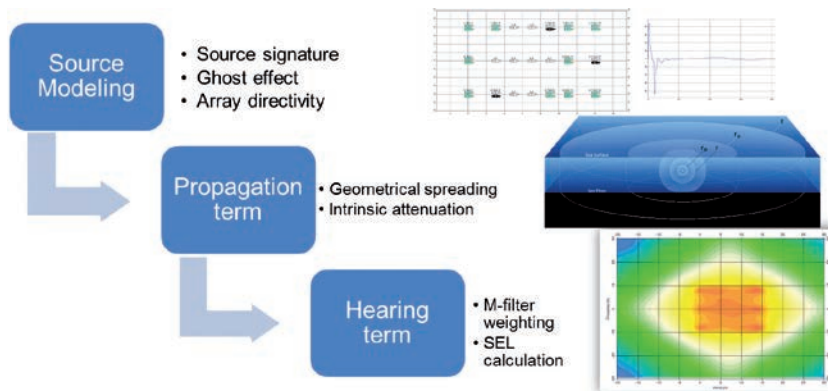


Figure 4 Ilustración del flujo de trabajo que se aplica para obtener un mapa del nivel de exposición sonora alrededor del arreglo de pistolas de aire a partir de las firmas del arreglo modelizadas.

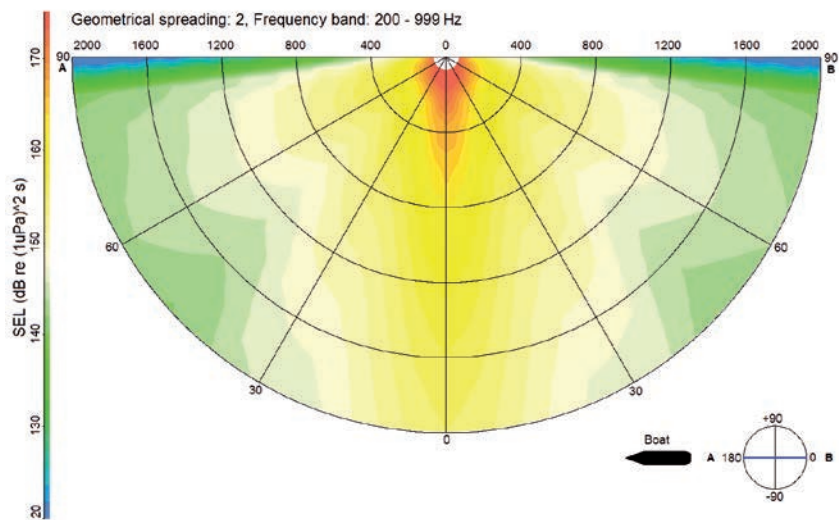


Figura 5 Gráfico polar de la direccionalidad del arreglo para el arreglo de 3090 pulgadas cúbicas filtrado con un filtro de paso de banda para cetáceos de altas frecuencias y aplicando la propagación esférica. El eje radial muestra la distancia desde la fuente en metros, mientras que el eje angular denota el ángulo de aparición desde el arreglo, indicando 0° una propagación vertical hacia abajo y +/- 90° una propagación horizontal. El gran decaimiento cerca de la superficie es resultado del efecto de espejo de Lloyd.

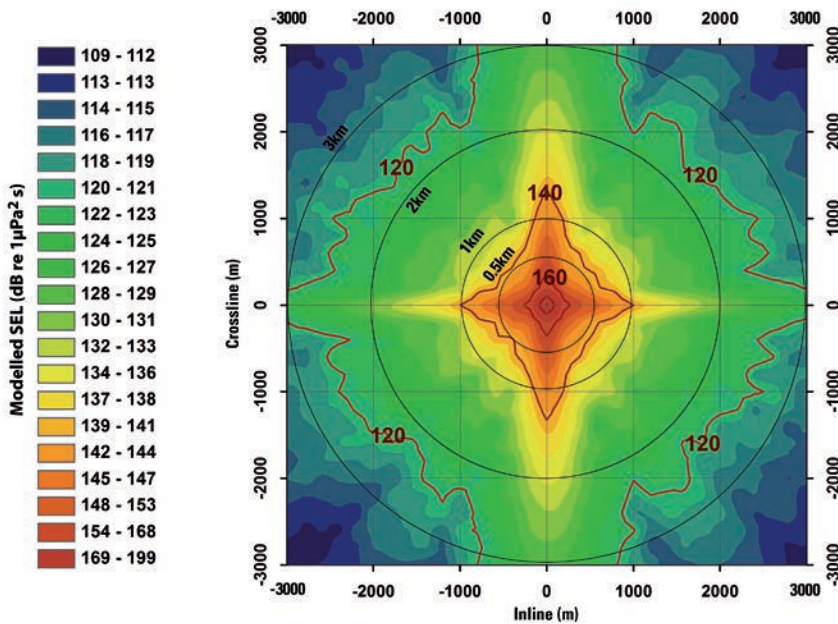
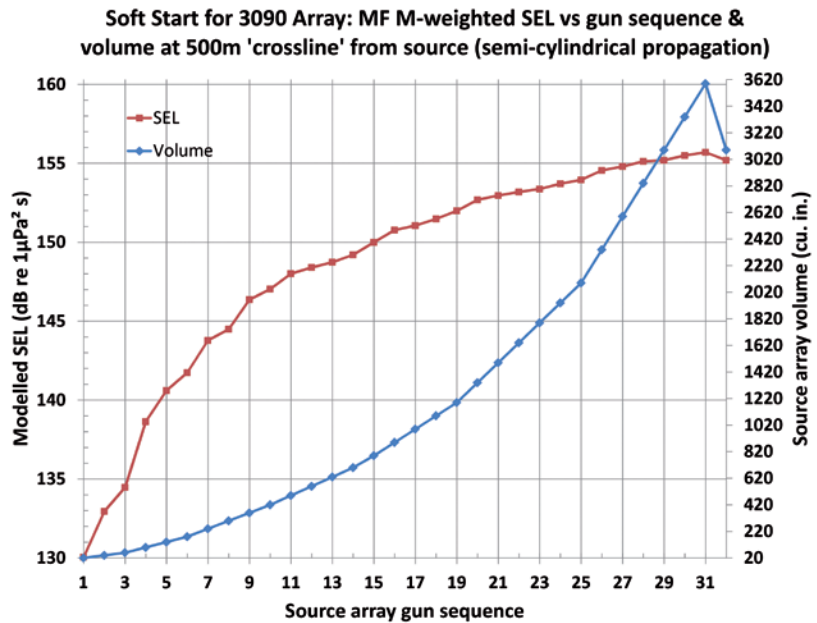


Figura 6 Mapa de nivel de exposición sonora (SEL) en un contorno de 3 km alrededor de la fuente. Los contornos rojos indican el SEL en intervalos de 20 dB. Los círculos indican distancias radiales desde la fuente por orientación. Observe la variación de la direccionalidad de la fuente entre el offset inline y crossline. La medida acústica SEL se calculó a 1 m bajo la fuente.

Figura 7 Modelización de un procedimiento de arranque suave. Cada secuencia en abscisa corresponde al encendido de una pistola adicional, comenzando con las pistolas más pequeñas. Las secuencias 30 y 31 corresponden al encendido también de las pistolas de repuesto.



Aplicación a medidas de mitigación específicas

Los mapas y gráficos SEL o de presión RMS resultantes se pueden utilizar en la expedición de permisos y se pueden aplicar a la planificación de medidas de mitigación específicas. Aunque son posibles varias aplicaciones diferentes de los resultados del flujo de trabajo descrito, aquí restringimos nuestra discusión a tres que son de aplicación directa en los escenarios prácticos de la adquisición y que son las que con más frecuencia desean los reguladores. En las siguientes figuras mostramos cálculos de ejemplo basados en el filtro de Southall de “cetáceos de frecuencia media” (Figura 3) y un modelo de propagación semicilíndrico.

La Figura 6 muestra un mapa de los valores SEL calculados en un cuadrado de 6 x 6 km alrededor de la fuente para el arreglo de 3090 pulgadas cúbicas. El contorno interior en el centro del gráfico tiene un valor SEL de 198 dB respecto a 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{ s}$ y el segundo contorno es de 183 dB respecto a 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{ s}$. Representan los umbrales de lesiones y alteración conductual, respectivamente, de Southall et al. (2007). Este ejemplo sugiere un radio de seguridad de 200 m fuera del cual no se excedería el límite de 183 dB (Southall et al., 2007). Así, la geometría y el plan de adquisición de la prospección se pueden adaptar en consecuencia. Además, el tamaño del radio de seguridad puede influir en la planifica-

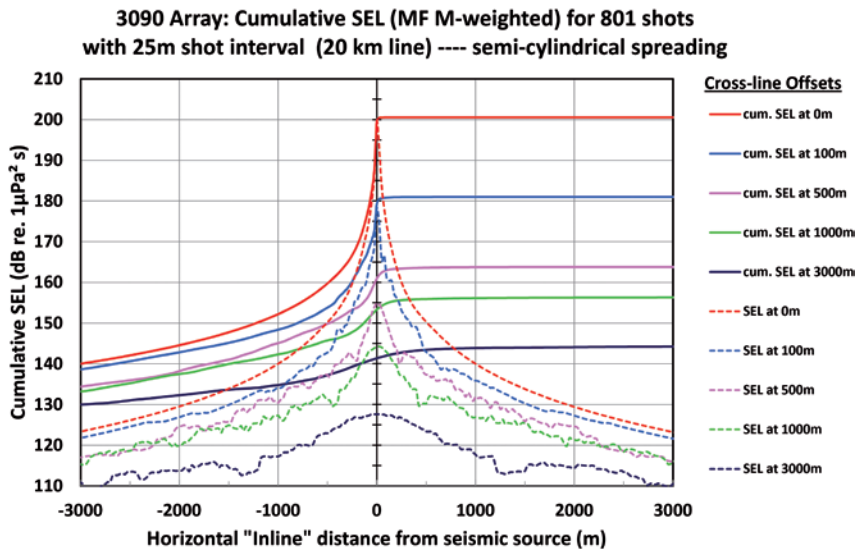


Figura 8 Valores SEL individuales (discontinuas) y acumulados (continuas) recibidos por un observador estacionario para una línea de navegación de disparos que pasan a diferentes distancias crossline del observador (color). Los valores SEL individuales más grandes se obtienen cuando el buque se encuentra con la quilla en ángulo recto. Los valores acumulados incluyen disparos de hasta +/- 10 km.

ción del despliegue de los MMO. Pueden ser aconsejables múltiples puntos de observación MMO o el despliegue de un sistema de monitorización acústica pasiva (PAM, por sus siglas en inglés) si, por ejemplo, los radios de seguridad son grandes y a lo largo de esa distancia se anticipa un deterioro de la visibilidad.

Otra posible aplicación es la estimación de la salida de la fuente para configuraciones de arreglos individuales en un procedimiento de arranque suave (Figura 7). En este proceso, las pistolas individuales de un arreglo se encienden secuencialmente para aumentar gradualmente la salida de la fuente. El proceso pretende dispersar la vida marina lejos de la fuente con una salida menor de la fuente antes de que se alcancen elevados niveles con la fuente a intensidad completa. Para que sea eficaz, se debe conocer la salida de la fuente de las configuraciones individuales del arreglo en la secuencia para garantizar que los valores SEL se mantengan por debajo de los límites reglamentados durante el procedimiento. Las diferentes formas de las curvas de volumen (azul) y SEL (rojo) de la Figura 7 son resultado de la dependencia en forma de raíz cúbica entre el volumen y la salida de la fuente.

A veces, se requiere la salida acumulada de todos los disparos de una línea de navegación particular (Figura 8). Aquí, el valor SEL recibido por un mamífero inmóvil observador se calcula y se suma a lo largo de toda la línea de navegación a distancias variables. Tenga en cuenta que, aunque en la figura sólo se muestran los perfiles de ± 3 km, se modelizó el efecto acumulado para toda la línea de navegación de 20 km. Los valores SEL individuales son más grandes cuando el buque está con la quilla en ángulo recto respecto al observador, aquí el centro de la línea de navegación. Las líneas continuas indican los valores SEL acumulados sumados para todos los disparos de una línea de navegación. Conforme el buque se aleja del observador, los valores SEL individuales son subsiguientemente más pequeños y se añade poco al valor

acumulado. Observe que los valores SEL acumulados están dominados por los disparos más cercanos directamente en ángulo recto respecto al observador, donde los valores SEL son mayores.

Conclusión y perspectivas

Las medidas para mitigar el impacto ambiental de las prospecciones sísmicas sobre los mamíferos marinos pueden llegar a ser más eficaces si se modeliza la salida esperada de la fuente en la etapa de planificación y de obtención de permisos. Una estimación precisa de la salida de la fuente se obtiene mediante las firmas de campo lejano modelizadas que incluyen los principales efectos físicos alrededor de la fuente. Hemos mostrado que este modelo físico puede describir la salida de la fuente con mucha precisión a través del rango de frecuencias sísmicas de hasta 1 kHz.

Presentamos un flujo de trabajo para la modelización ambiental que se basa en la modelización de la firma de la fuente. El flujo de trabajo proporciona un medio robusto para obtener los indicadores clave para la estimación de la salida de la fuente en conformidad con los requisitos regulatorios, incluyendo SPL_{RMS} y SEL. Dichas estimaciones se pueden aplicar de numerosos modos para la planificación de medidas de mitigación específicas. Hemos presentado tres de dichas medidas, desde la estimación de los radios de seguridad y las zonas de exclusión hasta la planificación de procedimientos de arranque suave y la estimación de los valores SEL acumulados a lo largo de una línea de navegación.

La investigación actual se centra en el avance de la modelización de la propagación del sonido basada en la ecuación de las ondas para mejorar la precisión de la modelización a larga distancia con el objetivo de incluir efectos como la variación de la batimetría, los perfiles de velocidad del sonido y las propiedades del lecho marino.

Agradecimientos

La adquisición de los datos que se muestran en la Figura 1 se financió a través del Programa conjunto de la industria sobre sonido de exploración y producción y vida marina. Estamos muy agradecidos a Petroleum Geo-Services por el permiso para publicar los resultados que se presentan en este artículo. La mayoría de las figuras de este artículo se produjeron con Nucleus, un producto de PGS.

Referencias

- Dragoset, W.H. [1990] Air-gun array specs: a tutorial. *The Leading Edge*, 9(1), 24-32.
- Dragoset, B. [2000] Introduction to air guns and air-gun arrays. *The Leading Edge*, 19(8), 892-897.
- Gilmore, F.R. [1952] Growth and collapse of a spherical bubble in a viscous compressible liquid. *Report No. 264*, Hydrodynamics Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena.
- Herring, C. [1949] Theory of the pulsations of the gas bubble produced by an underwater explosion. *Underwater Explosion Research*, 2, Office of Naval Research, Dept. of the Navy.
- Jensen, F., Kupermann, W., Porter, M. and Schmidt, H. [2000] *Computational ocean acoustics*. Springer Verlag, New York.
- Kirkwood, J.G. and Bethe, H.A. [1942] *The pressure wave produced by underwater explosion*. Office of Scientific Research and Development (OSRD) report No. 588.
- Landrø, M. [1992] Modelling of GI gun signatures. *Geophysical Prospecting*, 40, 721-747.
- Langhammer, J. [1994] *Experimental studies of energy loss mechanisms in air-gun bubble dynamics*. PhD thesis, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) Trondheim, Norway.
- Laws, R.M., Hatton, L. and Haartsen, M. [1990] Computer modelling of clustered airguns. *First Break*, 8(9), 331-338.
- Mattson, A., Parkes, G.E. and Hedgeland, D. [2012] Svein Vaage broadband air gun study. *The effects of noise on aquatic life, Advances in Experimental Medicine and Biology*, 730, 469-471.
- Parkes, G.E. and Hatton, L. [1986] *The marine seismic source*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- Southall, 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, W.J., Thomas, J.A. and Tyack, P.L. [2007] Aquatic mammals – marine mammal noise exposure criteria: initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals*, 33(4), 411-509.
- Strandenes, S. and Vaage, S. [1992] Signatures from clustered airguns. *First Break*, 10(8), 305-312.
- Urban, H.G. [2000] *Handbuch der Wasserschalltechnik, STN Atlas Elektronik*, Bremen.
- Ziolkowski, A.M. [1970] A method for calculating the output pressure waveform from an air gun. *Geophysical Journal of the Royal Astrological Society*, 21, 137-161.