



FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Metodología para la predicción y evaluación de impacto acústico sobre fauna subacuática (mamíferos)

Bastián-Monarca, N. A.¹; Montenegro, A.L.²; Álvarez, J.P.³

¹ Acústica Austral, Diego Portales 860, Puerto Montt, Chile, nbastian@acusticaustral.cl

² Acústica Austral, Diego Portales 860, Puerto Montt, Chile, almonenegro@acusticaustral.cl

³ Acústica Austral, Diego Portales 860, Puerto Montt, Chile, jpalvarez@acusticaustral.cl

Resumen

En este trabajo se presenta una metodología para la predicción y evaluación del impacto acústico sobre fauna subacuática (mamíferos) de proyectos que ingresan al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) de Chile. En este sentido, la metodología considera la predicción de ruido submarino para bandas de 1/3 de frecuencia de octava, aplicando funciones de ponderación teniendo en consideración el espectro de audición de mamíferos marinos. Para la evaluación de impactos, se consideran umbrales asociados a posibles efectos fisiológicos y conductuales en los mamíferos marinos. Se observa que existe poca información de la caracterización sonora (en bandas de 1/3 de frecuencia de octava) de fuentes de ruido submarino (embarcaciones, tronaduras, etc), siendo dicha información fundamental para aplicar funciones de ponderación en frecuencia para representar la audición de mamíferos marinos bajo estudio. Asimismo, se aprecia que, en relación con los criterios de evaluación, los umbrales asociados a efectos conductuales son mucho más restrictivos que los de efectos fisiológicos, sobre todo para el grupo de mamíferos marinos correspondiente a Pinnípedos. Se concluye que la metodología propuesta permite evaluar el impacto acústico sobre mamíferos marinos, considerando su espectro de audición. Asimismo, se hace necesario realizar mayores estudios de caracterización sonora de fuentes de ruido submarino en bandas de frecuencia, generando una base de datos más amplia, dado que la literatura actual es muy acotada.

Palabras clave: impacto acústico, fauna subacuática, mamíferos

PACS: 43.30.-k.

1. INTRODUCCION

La evaluación de impacto acústico sobre fauna subacuática es una temática que cada vez tiene más relevancia en todo el mundo. En Chile, existe la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, la cual estipula en su artículo 11 que son de objetos de protección ambiental del ruido y vibraciones los recursos naturales renovables (en particular, fauna nativa asociada a los hábitats de relevancia para su nidificación, reproducción o alimentación). En base a esto, todos los proyectos que generan ruido bajo el agua, deben evaluar su potencial impacto en la fauna marina. Este trabajo se centra en los mamíferos marinos. En este aspecto, se suele evaluar el efecto conductual y fisiológico que

puede provocar el ruido sobre la fauna marina para determinar si existe un impacto sobre las especies. Los criterios de evaluación definen niveles en función de los tipos de ruido impulsivo o continuo. Para los efectos fisiológicos, las recomendaciones de la National Marine Fisheries Service [NMFS] en su documento “Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0)” del 2018 [1] es una buena guía. De forma similar, para los efectos conductuales, el documento “Marine mammal noise exposure criterion: initial scientific recommendations” de Southall et al [2] es una referencia ampliamente utilizada. Respecto a la predicción de ruido subacuático, es importante realizar los análisis en bandas de

1/3 de frecuencia, dado que, para cada tipo de especie de fauna marina, existen umbrales de audición diferentes, que requieren usar curvas de ponderación para emular la audición de dichas especies. Complementando lo anterior, una buena práctica para evaluar el impacto de un proyecto es efectuar un monitoreo continuo de ruido de por lo menos 24 horas, antes y después de la implementación del proyecto, para tener antecedentes de los niveles de ruido existentes. En este trabajo, se describe brevemente las normativas para evaluar el efecto fisiológico y conductual en mamíferos marinos, se describen las ecuaciones para proyectar los niveles de ruido desde una fuente a un punto receptor y se presentan algunos resultados de mediciones continuas de ruido bajo el agua durante 24 horas.

2. CRITERIOS DE EVALUACION EN MAMIFEROS MARINOS

2.1 Efectos fisiológicos

Para los efectos fisiológicos, se consideran las recomendaciones entregadas por la *National Marine Fisheries Service* [1].

Dichas recomendaciones entregan niveles de exposición de ruido límites para evitar cambios en el umbral auditivo de tipo temporal (TTS) o permanente (PTS), para cada tipo de grupo mamífero marino para ruidos de tipo no impulsivo.

En las siguientes tablas, se presenta la clasificación de grupos mamíferos marinos que considera la guía y los niveles límites de exposición sonora acumulada en un periodo de 24 horas, respectivamente.

Tabla 1: Espectro auditivo de mamíferos marinos.
Fuente: [1]

Grupos auditivo mamíferos marinos	Rango de audición estimado	Especies representadas
Cetáceos baja frecuencia (LF)	7 Hz a 35 kHz	Ballenas barbadas
Cetáceos media frecuencia (MF)	150 Hz a 160kHz	Delfines, ballenas dentadas, ballenas

Grupos auditivo mamíferos marinos	Rango de audición estimado	Especies representadas
frecuencia (MF)		nariz de espada, ballenas nariz de botella
Cetáceos alta frecuencia (HF)	275 Hz a 160 kHz	Marsopas, cachalotes pigmeos, cachalotes enanos, delfines de río, <i>Cephalorhynchus</i> (delfín chileno, entre otros), <i>Lagenorhynchus cruciger</i> (delfín cruzado) y <i>Lagenorhynchus australis</i> (delfín austral)
Pinnípedos fócidos (PW)	50 Hz a 86 kHz	Focas
Pinnípedos otáridos (OW)	60 Hz a 39 kHz	Leones y lobos marinos

Tabla 2: Niveles límites de exposición sonora acumulada en un periodo de 24 horas para ruido de tipo no impulsivo. Fuente: [1]

Grupos auditivo mamíferos marinos	SEL _{24h} (dB ref 1μPa ² -s ponderado a la especie)	
	TTS	PTS
Cetáceos baja frecuencia (LF)	179	199
Cetáceos media frecuencia (MF)	178	198
Cetáceos alta frecuencia (HF)	153	173
Pinnípedos fócidos (PW)	181	201
Pinnípedos otáridos (OW)	199	219

Asimismo, la guía presenta la siguiente ecuación para calcular el nivel de exposición sonora [1]:

$$SEL = NPS + 10 \log_{10}(T) \quad (1)$$

Donde:

SEL: es el nivel de exposición sonora acumulada en un periodo de tiempo *T* (dB).

NPS: es el nivel de presión sonora en el punto receptor (dB).

T: es el periodo de exposición al nivel de presión sonora (s).

Complementando lo anterior, la guía entrega la ecuación para calcular la función de ponderación en frecuencia $W(f)$ al espectro de audición del grupo mamíferos marinos para una frecuencia de interés f (en kHz) [1] [3]:

$$W(f) = C + 10 \log_{10} \left\{ \frac{(f/f_1)^{2a}}{[1 + (f/f_1)^2]^a [1 + (f/f_2)^2]^b} \right\} \quad (2)$$

Donde:

$W(f)$: es la función de ponderación del umbral auditivo (dB).

f : es la frecuencia de interés (kHz).

a, b, f_1, f_2 y C : son parámetros que dependen del grupo de mamíferos marinos. f_1, f_2 en kHz, a y b son adimensionales y C en dB.

En la siguiente tabla, se presentan los valores de los parámetros recién mencionados.

Tabla 3: Valores de parámetros de cálculo de $W(f)$. **Fuente:** [1].

Grupo auditivo mamíferos marinos	a	b	f_1 (kHz)	f_2 (kHz)	C (dB)
LF	1	2	0,20	19	0,13
MF	1,6	2	8,8	110	1,20
HF	1,8	2	12	140	1,36
PW	1	2	1,9	30	0,75
OW	2	2	0,94	25	0,64

2.2 Efectos conductuales

A pesar de la carencia actual de información científica sobre respuestas conductuales y fisiológicas de mamíferos marinos frente a fuentes emisoras de ruido submarino, existe un avance en la determinación de umbrales en la literatura técnica para prevenir cambios conductuales [4]. En este sentido, se consideran los criterios entregados por Southall et al [2] como criterio de evaluación, el cual dependen del nivel de presión sonora ponderada para cada grupo auditivo, como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 4: Umbrales establecidos para evitar impactos conductuales. **Fuente:** [2].

Grupo auditivo mamíferos marinos	NPS ponderada por frecuencia en dB (ref 1μPa)	
	Pulso único	Continuo
Cetáceos de baja frecuencia (LF)	183 dB	+140
Cetáceos de mediana frecuencia (MF)	183 dB	+120
Cetáceos de alta frecuencia (HF)	183 dB	+120
Pinnípedos en agua	171 dB	80-110 dB
Pinnípedos en aire	100 dB	70-110 dB

3. PROYECCION DE NIVELES DE RUIDO BAJO EL AGUA

El modelo de propagación comúnmente utilizado en acústica submarina está basado en la ecuación SONAR, que originalmente fue desarrollada para los sistemas de SONARES (SOund Navigation And Ranging). El nivel en el receptor (RL) de un sonido puede ser calculado como el nivel de la fuente (SL) menos la pérdida de transmisión (TL) [5]:

$$RL = SL - TL \quad (3)$$

En aguas profundas (aguas mayores a 200m de profundidad [6], cuando el sonido se puede propagar de forma uniforme en todas las direcciones, la pérdida de transmisión puede ser modelada a una distancia r como [5]:

$$TL_{sph} = 20 \log_{10}(r/1m) \quad (4)$$

En aguas poco profundas (menores a 200m de profundidad [7], la propagación puede ser modelada de forma cilíndrica [5]:

$$TL_{cyl} = 10 \log_{10}(r/1m) \quad (5)$$

También es factible calcular la absorción [5]:

$$TL_{abs} = \alpha r \quad (6)$$

Donde α especifica la cantidad de absorción en dB/km y es en función de la frecuencia. Una

aproximación de α (dB/m) es $0,036 f^{1,5}$, donde f es la frecuencia en kHz [8][9].

En adición, la pérdida de transmisión es comúnmente modelada como una combinación de propagación esférica y cilíndrica, y absorción [5]:

$$TL = 20 \log_{10}(h/1m) + 10 \log_{10}(r/h) + \alpha r \quad (7)$$

Donde h es la profundidad (m).

Por otra parte, también existe la propagación cilíndrica – canal sonoro [10]:

$$RL = SL - 10 \log_{10}(H) - 10 \log_{10}(r) \quad (8)$$

Donde:

RL: es el nivel en el receptor.

SL: es el nivel de la fuente a 1m.

H: es la profundidad del canal (m).

r: distancia al receptor (m). Para propagación cilíndrica $r > H$.

En base a las ecuaciones anteriores, se obtiene un modelo de propagación de ruido para calcular los niveles de ruido en los receptores (fauna marina). Es importante precisar que se utiliza dicha ecuación para calcular los niveles de ruido en cada frecuencia en 1/3 de octava, dando que los valores de SL y el factor de $0,036 f^{1,5}$, asociado a la absorción, dependen de la frecuencia.

Respecto a los valores de SL, la mayoría de la literatura presenta niveles globales de ruido, por ejemplo [11]. Por lo tanto, normalmente es necesario caracterizar el nivel de emisión de ruido de las fuentes de ruido bajo el agua, con el fin de obtener niveles en bandas de 1/3 de octava de frecuencia para poder proyectar los niveles. Sin embargo, algunos estudios realizados en Chile [10][12] presentan niveles de ruido bajo el agua en bandas 1/3 de octava de frecuencia de diferentes tipos de fuentes de ruido.

4. MEDICIONES CONTINUAS DE NIVELES DE RUIDO BAJO EL AGUA

Para evaluar el impacto acústico sobre fauna subacuática (mamíferos), es fundamental efectuar mediciones de niveles de ruido bajo el

agua de la situación actual del entorno donde se encuentran los mamíferos marinos (sin proyecto), para entender la condición sonora al que están expuestas las especies. Se suelen efectuar análisis de percentiles de ruido de la condición basal, donde varios autores recomiendan considerar el percentil L10 como descriptor de la condición basal de ruido [13][14].

A continuación, se presentan algunos resultados de la condición basal de ruido subacuático durante 24 horas, efectuado en un Proyecto en el sur de Chile.

4.1 Instrumentación

Se utilizó un Hidrófono con las siguientes características:

- Rango de frecuencia: 10Hz a 24kHz ± 2 dB.
- Sensibilidad nominal: -208dBV re 1 μ Pa.
- Directividad horizontal (20kHz): $\pm 0,2$ dB.
- Directividad vertical (20kHz): ± 1 dB.
- Temperatura de operación: -10°C a 80°C.
- Rango sistema: 90 a 190 dB(Z) re 1 μ Pa.

4.2 Procedimiento de medición

Se efectuaron mediciones del Nivel de Presión Sonora (NPS) durante 24 horas en un punto representativo de la ubicación del Proyecto. En este sentido, se utilizó una embarcación (habilitada para pernoctar) para llegar al punto representativo y se instaló el hidrófono a una profundidad de 25 metros (y el fondo tenía una profundidad de 64 metros).

4.3 Registro y análisis de datos

El registro de datos fue a través de grabaciones de audio en 24 bits y con una frecuencia de muestreo de 48 kHz. Posterior a esto, se realizó un análisis de las grabaciones con el software dBWav v.1.3.4 de la empresa Marshall Day Acoustics.

4.4 Resultados

A continuación, se presentan los resultados de las mediciones de ruido durante 24 horas. Todos los niveles se muestran sin ponderación de frecuencia y los resultados se presentan en dB (ref 1 μ Pa).

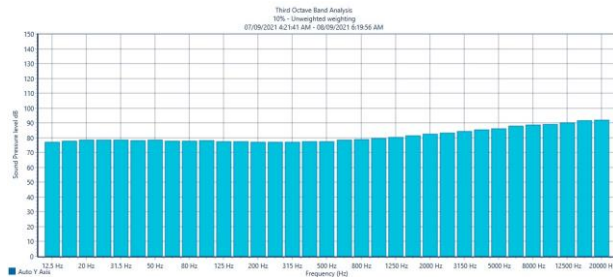


Figura 1: Resultado del percentil L10 medido durante 24 horas en bandas de 1/3 de frecuencia.

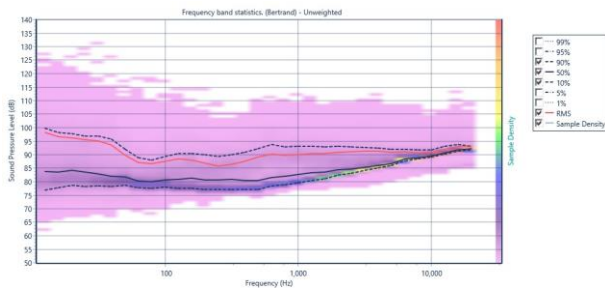


Figura 2: Resultado de nivel de presión sonora (NPS) y densidad espectral medidos durante 24 horas.

Al analizar la Figura 1, se aprecia que, los niveles de ruido en bandas de 1/3 de frecuencia son bastante estables, con leves incrementos en las frecuencias medias altas. El nivel percentil global L10 obtenidos fue de 99,9 dB (ref 1 μ Pa).

Al analizar la Figura 2, se observa que la incorporación de la densidad espectral permite comprender de mejor manera la composición de los sonidos de la condición basal de ruido, donde se destacan las frecuencias medias, altas y muy altas. Incluso, durante las mediciones de ruido, se registraron vocalización de delfines, lo cual se asocia con frecuencias muy altas (superiores a los 10.000 Hz), lo cual, está incluido dentro de la Figura al ver los colores más intensos (amarillos y rojos) sobre los 10.000 Hz.

8. CONCLUSIONES

Para evaluar el impacto acústico sobre fauna subacuática (mamíferos) es necesario considerar criterios relacionados a efectos fisiológicos (como los de la NMFS [1]) y conductuales (como los de Southall et al [2]). Dichos criterios se deben evaluar para cada grupo auditivo de mamíferos marinos presentes en la zona de interés de cada proyecto, considerando su espectro auditivo y aplicando una ponderación de frecuencia en los niveles de ruido proyectados en los puntos de interés. Por lo anterior, una correcta predicción de impactos sobre fauna subacuática (mamíferos) requiere proyectar niveles de ruido bajo el agua en bandas de 1/3 de octava de frecuencia, aplicando la ponderación de frecuencia de cada grupo auditivo de mamíferos marinos, para evaluar el impacto acústico sobre dichas especies. Asimismo, es recomendable efectuar mediciones continuas de ruido bajo el agua para obtener la condición basal de ruido de la zona de interés de mamíferos marinos. Un criterio recomendado por diferentes científicos es utilizar el descriptor L10 de la medición continua como condición basal de ruido. Asimismo, efectuar un análisis de la densidad espectral de la medición continua de ruido permite comprender la composición sonora de la condición basal de ruido, enriqueciendo el entendimiento del patrimonio sonoro subacuático de la zona de interés. Finalmente, para proyectos que ingresan al SEIA en Chile, es recomendable evaluar los efectos fisiológicos y conductuales que puede generar el proyecto en evaluación sobre los mamíferos marinos de interés, considerando las recomendaciones expuestas en el presente trabajo, con el fin de asegurar la inexistencia de aquellos efectos, características o circunstancias del artículo 11 literal b) de la Ley 19.300 de Chile.

REFERENCIAS

[1] National Marine Fisheries Service (NMFS). 2018 Revision to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0). Underwater Acoustic Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts, 2018.

<http://www.bu.ufsc.br/teses/PEMC1445-T.pdf>. ISBN 978-8591677405.

- [2] Southall, B.L., Bowles, A.E., Ellison, W.T., Finneran, J.J., Gentry, R.L., Greene, C.R., Kastak, D., Ketten, D.R., Miller, J.H., Nachtigall, P.E., Richardson, W.J., Thomas, J.A. & Tyack, P.L. *Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations*. Aquatic Mammals, Volume 33, Number 4, 2007.
- [3] Southall, B.L., Bowles, A.E., Ellison, W.T., Finneran, J.J., Gentry, R.L., Greene, C.R., Kastak, D., Ketten, D.R., Miller, J.H., Nachtigall, P.E., Richardson, W.J., Thomas, J.A. & Tyack, P.L. *Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects*. Aquatic Mammals 2019, 45(2), 125-232, 2019.
- [4] Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Gobierno de Chile. *Elaboración de una guía técnica para la evaluación de impacto producido por ruido subacuático*. Estudio desarrollado por la Universidad de Concepción, Copas Sur-Austral y Universidad Católica de la SSMMA de Concepción, 2018.
- [5] Erbe, C., Reichmuth, C., Cunningham, K., Lucke, K. & Dooling, R. *Communication masking in marine mammals: A review and research strategy*. Marine Pollution Bulletin 103 (2016), 15-38, 2016.
- [6] Laboratory of Applied Bioacoustics (LAB), Technical University of Catalonia (UPC). *Best Practices in Management, Assessment and Control of Underwater Noise Pollution*, 2009.
- [7] P.C. *Advanced applications for underwater acoustic modeling*. Hindawi Publishing Corporation, Advances in Acoustics and Vibration, Volume 2012, Article ID214839, DOI: 10.1155/2012/214839, 2012.
- [8] Richardson, W.J., Greene, C.R., Malme, C.I. & Thomson, D.H. *Marine mammals and noise*. Academic Press Inc., New York, 1995.
- [9] Redondo, L., Ruiz-Mateo, A. *Ruido subacuático: fundamentos, fuentes, cálculo y umbrales de contaminación ambiental*. Ingeniería Civil 186/2017, 2017.
- [10] Yori, A. *Fuentes antropogénicas de ruido subacuático: caracterización y evaluación de su impacto*. XIX Seminario Ruido Ambiental del Ministerio del medio Ambiente de Chile (2019).
- [11] Hildebrand, J.A. *Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean*. Marine Ecology Progress Series, 395, 5-20, 2009.
- [12] WSP. *Anexo III: Informe de medición de ruido submarino, de informe de evaluación de emisión de ruido Proyecto "Centro de engorda de salmónidos estero Pérez de arce, al noreste de punta rivera, isla Riesco, comuna de río verde, provincia de magallanes, región de magallanes y de la antártica Chilena PERT N°207121260"*. Informe de medición de ruido submarino realizado por Alfio Yori de la Universidad Austral de Chile, 2019.
- [13] Mennitt, D., Sherrill, K. & Fristrup, K. *A geospatial model of ambient sound pressure levels in the contiguous United States*. J. Acoust. Soc. Am. 135, 2746–2764, 2014.
- [14] Merchant, N.D. et al. *Underwater noise levels in UK waters*. Sci. Rep. 6, 36942; doi: 10.1038/srep36942, 2016.