

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL REGISTRO SÍSMICO OFFSHORE “3D” ÁREA AUS105, AUS106 Y MLO121, ARGENTINA

CAPÍTULO 6 - MODELACIÓN ACÚSTICA

FEBRERO DE 2023

ÍNDICE

1	METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN AGUA	7
1.1	CONCEPTOS TEÓRICOS SOBRE LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO	7
1.2	MODELOS MATEMÁTICOS	13
2	UMBRALES DE ATENUACIÓN ACÚSTICA RELACIONADOS CON LA AFECTACIÓN DE MAMÍFEROS MARINOS Y PECES	14
3	PROCEDIMIENTO DE AUMENTO GRADUAL DE LA EMISIÓN Y RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE SPL Y DE SEL	18
4	MODELACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE LA INTENSIDAD SONORA (SPL)	21
4.1	BATIMETRÍA	21
4.2	DIRECTIVIDAD DE LA FUENTE	21
4.3	ÉPOCA PREVISTA PARA EL RELEVAMIENTO	21
4.4	DATOS OCEANOGRÁFICOS	21
4.5	SEDIMENTOS MARINOS	21
4.6	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN MÍNIMA	22
4.7	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	26
5	RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN MATEMÁTICA SISTEMÁTICA DE LA PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN	28
6	RESULTADOS DE LA PROPAGACIÓN DEL SEL	31
7	EVALUACIÓN DE DISTANCIAS PARA ALCANZAR LOS UMBRALES DE SPL	44
8	CÁLCULO DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN ACÚSTICA (SEL) ACUMULADO	48

8.1	METODOLOGÍA	48
8.2	CÁLCULO DEL SEL ACUMULADO METODOLOGIA DE EMISIÓN DUAL (AZIMUT 0°-90°)	56
8.3	CÁLCULO DEL SEL ACUMULADO METODOLOGIA DE EMISIÓN INTERPOLADA (AZIMUT 0°-45°-90°)	66
9	CONCLUSIONES	73
10	BIBLIOGRAFÍA	76

ANEXO I: PERFILES OCEANOGRÁFICOS

ANEXO II: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA PÉRDIDA POR TRANSMISIÓN DEL SONIDO

ANEXO III: RESULTADOS DE LA PROPAGACIÓN DEL SEL

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Regiones de los diferentes procesos dominantes de atenuación del sonido en el mar.	8
Figura 2. Pérdidas por absorción en función de la frecuencia según la dominancia del Ácido Bórico ($B(OH)_3$), moléculas de Sulfato de Magnesio ($MgSO_4$) y Viscosidad.	10
Figura 3. Efecto espejo por reflexión en la superficie. Adaptado de Kuperman (2007)	10
Figura 4. Canales sónicos.	12
Figura 5. Funciones de peso (audiogramas) para diferentes especies	16
Figura 6. Evolución del volumen de emisión y del SPLpeak resultante durante el procedimiento de aumento gradual	18
Figura 7. Evolución del volumen de emisión y del SEL resultante durante el procedimiento de aumento gradual	19
Figura 8. Evolución del SPL y SELpeak resultantes del incremento del volumen de emisión durante el procedimiento de aumento gradual. Notar que las unidades de cada variable son diferentes.	20
Figura 9. Capa de sedimentos de fondo marino para el área de exploración sísmica. Polígonos rosas: áreas de concesión; polígono celeste: área de operación.	22
Figura 10. Ejemplo de matriz bidimensional (representación 2D) de la Pérdida de Transmisión para una frecuencia de 125 Hz calculada por el modelo RAM. Profundidad mínima Uniforme (B0)	23
Figura 11. Ejemplo de matriz bidimensional (representación 2D) de la Pérdida de Transmisión para una frecuencia de 125 Hz calculada por el modelo RAM. Profundidad variable Transecta 8 (BV8)	24
Figura 12. Ejemplo de matriz bidimensional (representación 2D) de la Pérdida de Transmisión para una frecuencia de 125 Hz calculada por el modelo RAM. Profundidad máxima Uniforme (BA)	24
Figura 13. Ejemplo de procesamiento de la matriz bidimensional de TL calculada por el modelo RAM para obtener la Pérdida de Transmisión mínima en vertical (línea azul oscilante) y la envolvente de mínimos en horizontal (línea roja). Frecuencia 125 Hz. Profundidad variable Transecta 8 (BV8)	25
Figura 14. Ejemplo de resultado final del procesamiento de la matriz bidimensional de TL calculada por el modelo RAM para obtener la Pérdida de Transmisión mínima en vertical y en horizontal. Frecuencia 125 Hz. Profundidad variable Transecta 8 (BV8)	25



Figura 15. Pérdida de Transmisión mínima en la vertical TL_v para la condición más conservativa del análisis de sensibilidad Profundidad constante mínima – 25 Hz a 1.000 Hz	29
Figura 16. Pérdida de Transmisión mínima en la vertical TL_v para la condición más conservativa del análisis de sensibilidad Profundidad constante máxima – 6,3 Hz a 1.000 Hz	30
Figura 17. Pérdida de Transmisión mínima en la vertical TL_v para la condición más conservativa del análisis de sensibilidad Profundidad Variable Transecta 8– 20 Hz a 1.000 Hz.....	30
Figura 18. SEL recibido (RL) para cada banda. Profundidad mínima Uniforme (B0). Azimut 0° Dip 85°. Sin Filtro.....	32
Figura 19. SEL recibido (RL) para cada banda. Profundidad mínima Uniforme (B0). Azimut 45° Dip 85°. Sin Filtro.....	33
Figura 20. SEL recibido (RL) para cada banda. Profundidad mínima Uniforme (B0). Azimut 90° Dip 85°. Sin Filtro.....	33
Figura 21. SEL recibido (RL) para cada banda. Profundidad Variable (BV8). Azimut 0° Dip 85°. Sin Filtro	34
Figura 22. SEL recibido (RL) para cada banda. Profundidad Variable (BV8). Azimut 45° Dip 85°. Sin Filtro	34
Figura 23. SEL recibido (RL) para cada banda. Profundidad Variable (BV8). Azimut 90° Dip 85°. Sin Filtro	35
Figura 24. SEL recibido (RL) para cada banda. Profundidad máxima Uniforme (BA). Azimut 0° Dip 80°. Sin Filtro.....	35
Figura 25. SEL recibido (RL) para cada banda. Profundidad máxima Uniforme (BA). Azimut 45° Dip 80°. Sin Filtro	36
Figura 26. SEL recibido (RL) para cada banda. Profundidad máxima Uniforme (BA). Azimut 90° Dip 80°. Sin Filtro	36
Figura 27. SEL recibido (RL). Profundidad mínima Uniforme (B0). Dip 0° - Azimut 90° Dip 85° Sin Filtro	40
Figura 28. SEL recibido (RL). Profundidad mínima Uniforme (B0). Azimut 0° Dip 0°-85° Sin Filtro	40
Figura 29. SEL recibido (RL). Profundidad mínima Uniforme (B0). Azimut 45° Dip 0°-85° Sin Filtro	41
Figura 30. SEL recibido (RL). Profundidad Variable (BV8). Dip 0° - Azimut 90° Dip 85° Sin Filtro	41
Figura 31. SEL recibido (RL). Profundidad Variable (BV8). Dip 0° - Azimut 45° Dip 85° Sin Filtro	42
Figura 32. SEL recibido (RL). Profundidad Variable (BV8). Azimut 0° Dip 0°-85° Sin Filtro ...	42
Figura 33. SEL recibido (RL). Profundidad máxima Uniforme (BA). Dip 0° - Azimut 90° Dip 80° Sin Filtro	43
Figura 34. SEL recibido (RL). Profundidad máxima Uniforme (BA). Dip 0° - Azimut 45° Dip 80° Sin Filtro	43
Figura 35. SEL recibido (RL). Profundidad máxima Uniforme (BA). Azimut 0° Dip 0°-80° Sin Filtro	44
Figura 36. Ejemplo de comparación entre los valores de $SPL_{peakTOTAL}$ y los diferentes umbrales para determinar las distancias correspondientes, para el escenario de Profundidad mínima Uniforme (B0)	46
Figura 37. Comparación entre los valores de $SPL_{peakTOTAL}$ y los diferentes umbrales para determinar las distancias correspondientes, para el escenario de Profundidad Variable (BV8)	47



Figura 38. Comparación entre los valores de $SPL_{peak_{TOTAL}}$ y los diferentes umbrales para determinar las distancias correspondientes, para el escenario de Profundidad máxima Uniforme (BA).....	48
Figura 39. Esquema geométrico utilizado para el cálculo del SEL_{cum}	50
Figura 40. Ilustración del movimiento relativo del arreglo emisor (azul) y de receptor (animal en movimiento, rojo). Durante el intervalo de tiempo t , el arreglo se mueve una distancia $l(0) - l(t)$, mientras que el animal se mueve una distancia $d(0)-d(t)$ en dirección perpendicular a la línea de transecta. $r(t)$ es la distancia radial desde el arreglo al receptor al tiempo t	51
Figura 41. Ejemplo de posiciones relativas y trayectorias del receptor y de los tres arreglos emisores (Ward, P., 2015).	51
Figura 42. SEL recibido por cada emisión. Aumento Gradual 40 minutos. Azimut movimiento del receptor 180° a 2 m/s durante el Aumento Gradual únicamente. Profundidad máxima (BA)	54
Figura 43. SEL acumulado. Aumento Gradual 40 minutos. Azimut movimiento del receptor 180° a 2 m/s durante el Aumento Gradual únicamente. Profundidad máxima (BA)	55
Figura 44. SEL recibido por cada emisión. Simulación de comparación SIN Aumento Gradual. Azimut movimiento del receptor 180° a 2 m/s durante 40 minutos. Profundidad máxima (BA)	55
Figura 45. SEL acumulado. Simulación de comparación SIN Aumento Gradual. Azimut movimiento del receptor 180° a 2 m/s durante 40 minutos. Profundidad máxima (BA)	56
Figura 46. SEL acumulado Emisión Dual. Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1.000 m del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s. Azimut movimiento del receptor 90° . Profundidad mínima Uniforme (B0).	57
Figura 47. SEL acumulado Emisión Dual. Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Azimut movimiento del receptor 90° . Velocidad del receptor 2 m/s constante. Profundidad mínima Uniforme (B0).	57
Figura 48. SEL acumulado Emisión Dual. Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1.000 m del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s. Azimut movimiento del receptor 90° . Profundidad variable (BV8).	58
Figura 49. SEL acumulado Emisión Dual. Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Azimut movimiento del receptor 90° . Velocidad del receptor 2 m/s constante. Profundidad variable (BV8).	58
Figura 50. SEL acumulado Emisión Dual. Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1.000 m del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s. Azimut movimiento del receptor 90° . Profundidad máxima Uniforme (BA).	59
Figura 51. SEL acumulado Emisión Dual. Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Azimut movimiento del receptor 90° . Velocidad del receptor 2 m/s constante. Profundidad máxima Uniforme (BA).	59
Figura 52. SEL recibido por emisión por peces, considerando que se encuentran ubicados a 50 m de la línea de relevamiento. Ejemplo para Profundidad mínima Uniforme (B0). ...	65
Figura 53. SEL acumulado igual al umbral de mortalidad potencial para peces con vejiga natatoria, considerando que se encuentran ubicados a 50 m de la línea de relevamiento. Ejemplo para Profundidad mínima Uniforme (B0).	65



Figura 54. SEL acumulado Emisión Interpolada. Aumento Gradual 25 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1.000 m del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s constante. Azimut movimiento del receptor 90°. Profundidad mínima Uniforme (B0).	66
Figura 55. SEL acumulado Emisión Interpolada. Aumento Gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1.000 m del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s constante. Azimut movimiento del receptor 90°. Profundidad mínima Uniforme (B0).	67
Figura 56. SEL acumulado Emisión Interpolada. Aumento Gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Azimut movimiento del receptor 90°. Velocidad del receptor 2 m/s constante. Profundidad mínima Uniforme (B0).	67
Figura 57. SEL acumulado Emisión Interpolada. Aumento Gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1.000 m del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s constante. Azimut movimiento del receptor 90°. Profundidad variable (BV8).	68
Figura 58. SEL acumulado Emisión Interpolada. Aumento Gradual 30 minutos (25% en 20 minutos). Posición inicial del receptor a 1.000 m del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s. Azimut movimiento del receptor 90°. Profundidad variable (BV8).	68
Figura 59. SEL acumulado Emisión Interpolada. Aumento Gradual 30 minutos (25% en 20 minutos). Posición inicial del receptor perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Azimut movimiento del receptor 90°. Velocidad del receptor 2 m/s constante. Profundidad máxima uniforme (BA).	69
Figura 60. SEL acumulado Emisión Interpolada. Aumento Gradual 30 minutos (25% en 20 minutos). Posición inicial del receptor perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Azimut movimiento del receptor 90°. Velocidad del receptor 2 m/s constante. Profundidad máxima uniforme (BA).	69

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Grupos auditivos con sus rangos de audición.	14
Tabla 2. Coeficientes de la formulación de cálculo de los Audiogramas por especie (Southall, 2019 y NMFS, 2018).	15
Tabla 3. Niveles de PTS y TTS para los distintos grupos auditivos. Fuentes: Southall et al 2019. Para SPL (pK) se suelen usar valores no ponderados. Para SEL las ponderados son en base al rango generalizado de audición para mamíferos marinos de 7 Hz to 160 kHz. En el caso de SEL se considera una acumulación de 24 horas o durante la duración real de la exposición.	17
Tabla 4. Parámetros del modelo RAM empleados	28
Tabla 5 Distancia recorrida por el rayo según la profundidad y ángulo $D = h * \tan(\text{Dip})$	31
Tabla 6. Profundidad mínima Uniforme (B0). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 0° entre Dip 0° y Dip 85°	38
Tabla 7. Profundidad mínima Uniforme (B0). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 45° entre Dip 0° y Dip 85°	38
Tabla 8. Profundidad mínima Uniforme (B0). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 90° entre Dip 0° y Dip 85°	38
Tabla 9. Profundidad Variable (BV8). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 0° entre Dip 0° y Dip 85°	38
Tabla 10. Profundidad Variable (BV8). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 45° entre Dip 0° y Dip 85°	39
Tabla 11. Profundidad Variable (BV8). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 90° entre Dip 0° y Dip 85°	39



Tabla 12. Profundidad máxima Uniforme (BA). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 0° entre Dip 0° y Dip 80°	39
Tabla 13. Profundidad máxima Uniforme (BA). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 45° entre Dip 0° y Dip 80°	39
Tabla 14. Profundidad máxima Uniforme (BA). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 90° entre Dip 0° y Dip 80°	39
Tabla 15. Distancias a la fuente para alcanzar los diversos umbrales y grupos auditivos evaluados. Profundidad mínima Uniforme (B0).	45
Tabla 16. Distancias a la fuente para alcanzar los diversos umbrales y grupos auditivos evaluados. Profundidad Variable (BV8).	45
Tabla 17. Distancias a la fuente para alcanzar los diversos umbrales y grupos auditivos evaluados. Profundidad máxima Uniforme (BA).	46
Tabla 18. Valores de SELcum (dB re 1 μPa^2 s) comparados con los umbrales de PTS para mamíferos y límites para peces. Profundidad mínima Uniforme (B0). Metodología de Emisión Dual.	61
Tabla 19. Valores de SELcum (dB re 1 μPa^2 s) comparados con los umbrales de PTS para mamíferos y límites para peces. Profundidad variable (BV8). Metodología de Emisión Dual.	62
Tabla 20. Valores de SELcum (dB re 1 μPa^2 s) comparados con los umbrales de PTS para mamíferos y límites para peces. Profundidad máxima Uniforme (BA). Metodología de Emisión Dual.	63
Tabla 21. Valores de SELcum (dB re 1 μPa^2 s) comparados con los umbrales de PTS para mamíferos y límites para peces. Profundidad mínima Uniforme (B0). Metodología de Emisión Interpolada. Procedimientos de aumento gradual equiespaciados.	70
Tabla 22. Valores de SELcum (dB re 1 μPa^2 s) comparados con los umbrales de PTS para mamíferos y límites para peces. Profundidad variable (BV8). Metodología de Emisión Interpolada. Procedimientos de aumento gradual equiespaciados.	71
Tabla 23. Valores de SELcum (dB re 1 μPa^2 s) comparados con los umbrales de PTS para mamíferos y límites para peces. Profundidad máxima uniforme (BA). Metodología de Emisión Interpolada.	72



CAPÍTULO 6 – MODELACIÓN ACÚSTICA

El objetivo fundamental de este Capítulo es evaluar la propagación del sonido producido por las emisiones sísmicas, estimando su evolución espacial en función de sus características y de las condiciones del medio acuático y del lecho marino, a los efectos de brindar elementos de juicio que permitan realizar posteriormente la evaluación de los posibles impactos y definir las medidas de mitigación más adecuadas.

1 METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN AGUA

1.1 CONCEPTOS TEÓRICOS SOBRE LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO

Una señal sonora que se propaga a través del agua sufre diversos procesos que la debilitan.

La Pérdida por Transmisión (TL, del inglés Transmission Loss) expresa la disminución de la energía acústica o el debilitamiento de la señal a medida que se propaga por un medio, desde un punto ubicado sobre el eje acústico de la fuente, a 1 m de su “centro”, y un punto distante (a una distancia R).

La Pérdida por Transmisión incluye todos los efectos inherentes a la propagación del sonido en el mar, cada uno de los cuales es muy complejo, comprendiendo:

- a) Spreading o dispersión geométrica, que consiste en el agrandamiento del frente de onda con la distancia;
- b) atenuación, que incluye, entre otros fenómenos, a la absorción química, el scattering, la viscosidad y la filtración hacia fuera de los canales sónicos.

Las siguientes ecuaciones pueden utilizarse para un cálculo aproximado de cómo la energía sonora se disipa en función de la distancia R de la fuente.

Pérdida por Expansión Esférico – Spherical Spreading

Cuando el sonido puede propagarse sin obstáculos o interacciones en forma uniforme en todas las direcciones, TL se calcula mediante la siguiente expresión:

$$TL_{esferico}(dB \text{ re } 1m) = 20 \cdot \log\left(\frac{R}{1m}\right) \quad [1]$$

Pérdida por Expansión Cilíndrica – Cylindrical Spreading

Cuando la distancia $R \geq H$ (donde H es la profundidad del agua), el sonido no puede propagarse en todas las direcciones como una onda esférica, sino como una onda cilíndrica que está limitada por el fondo marino y la superficie del mar. En este caso, TL puede calcularse como:

$$TL_{cilindrico}(dB \text{ re } 1m) = 10 \cdot \log\left(\frac{R}{1m}\right) \quad [2]$$

En general, cerca de la fuente y hasta alcanzar el lecho (según sea la profundidad del agua H), en un medio homogéneo el sonido se puede propagar en forma esférica, y luego para un rango R mayor que H se puede propagar en forma cilíndrica. A modo de ejemplo, para $R = 1.000 \text{ m}$, el logaritmo es igual a 3, $TL_{esferico} = 60 \text{ dB}$, $TL_{cilindrico} = 30 \text{ dB}$.

En ciertos casos, la propagación combinada puede ser cercana a un patrón intermedio, representado por un factor 15 en la fórmula [1].



A lo largo del presente Capítulo y sus Anexos, se representarán en los gráficos los tres patrones de Pérdida por Transmisión teóricos únicamente como marco de referencia, al sólo efecto de permitir visualizar a que condiciones de transmisión geométrica se asemejan los resultados de las modelizaciones de propagación del sonido presentadas. Como se verá, en distancias menores a la profundidad de agua, las propagaciones suelen ser similares a las de tipo esférico, mientras que para distancias mayores, la tendencia se asemeja más a una propagación intermedia.

Atenuación del sonido

La atenuación del sonido se produce porque la vibración de las moléculas de agua genera calor, disipando la energía, y por otros procesos debidos a la absorción del medio, la dispersión o scattering de las ondas por las partículas en suspensión. En este proceso es irrelevante a frecuencias por debajo de 10.000 Hz (Urick, 1983).

La atenuación del sonido se suele expresar a través de la siguiente ecuación en función del rango:

$$TL_{\text{atenuación}} (\text{dB}) = - \alpha R \quad [3]$$

El coeficiente de atenuación α se expresa en dB/km y R en km.

La atenuación del sonido con la distancia es función de la frecuencia, siendo más fuerte para frecuencias altas. No obstante, la atenuación aumenta con la frecuencia en forma sensible, sólo para frecuencias mucho más altas que las empleadas en los arreglos sísmicos.

Por otro lado, estos mecanismos de atenuación no son bien conocidos para frecuencias menores a 100 Hz, como se indica en la Figura 1 (Jensen, 2011).

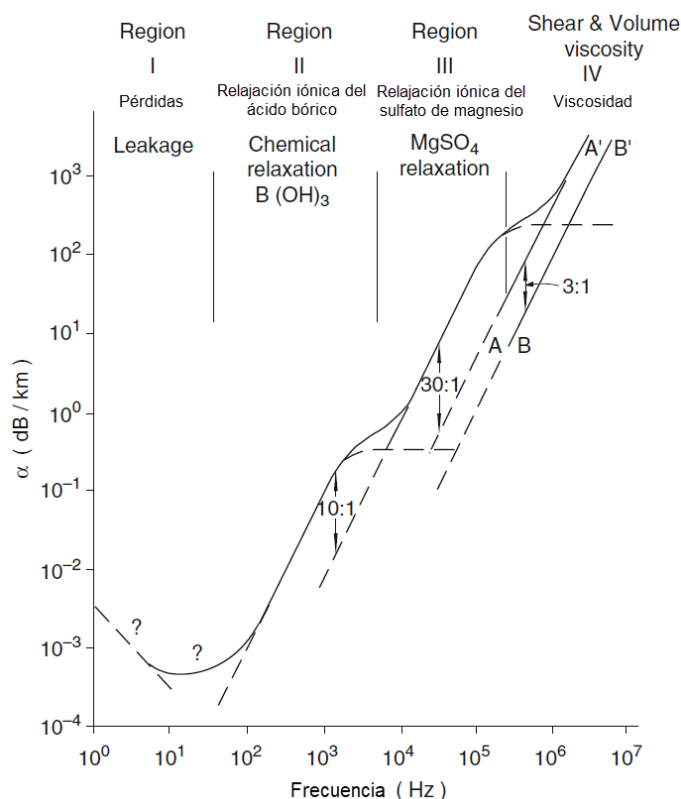


Figura 1. Regiones de los diferentes procesos dominantes de atenuación del sonido en el mar.



La viscosidad es la mayor causa de atenuación del sonido a altas frecuencias en agua marina (por encima de los 100 kHz). La relajación iónica del ácido bórico (hasta los 10 kHz) y del sulfato de magnesio (10 kHz-100 kHz) genera importantes absorciones del sonido en agua marina en estas frecuencias.

La atenuación por absorción puede estimarse mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = 0.106 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} e^{(pH-8)/0.56} + 0.52 \left(1 + \frac{T}{43}\right) \frac{S}{35} \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} e^{-z/6} + 4.9 \times 10^{-4} f^2 e^{-(T/27+z/17)}$$

[4]

$f_1 = 0.78(S/35)^{1/2} e^{T/26}$ $f_2 = 42 e^{T/17}$; f [kHz], α [dB/km]

Rango de Validez: $-6 < T < 35^\circ\text{C}$ ($S=35\text{ppt}$, $pH=8$, $z=0$)
 $7.7 < pH < 8.3$ ($T=10^\circ\text{C}$, $S=35\text{ppt}$, $z=0$)
 $5 < S < 50\text{ppt}$ ($T=10^\circ\text{C}$, $pH=8$, $z=0$)
 $0 < z < 7\text{km}$ ($T=10^\circ\text{C}$, $S=35\text{ppt}$, $pH=8$)

Los valores obtenidos para condiciones típicas del área de estudio, correspondientes a una temperatura de 6° para la estación del año más conservativa (Primavera) y una salinidad igual a 33 ppt, se presentan en la Figura 2.

Recién a partir de los 1.600 Hz la atenuación por absorción comienza a ser del orden de 0,1 dB/km, y para 10 kHz ya supera 1 dB/km, con lo cual sólo su influencia para frecuencias de ese orden o superiores resulta muy significativa, no obstante lo cual a los efectos de mantener un criterio conservativo se ha considerado la atenuación para las modelizaciones de Pérdida de Transmisión efectuadas.

Dentro del rango de frecuencias de interés, las variaciones de la atenuación para salinidades y temperaturas mínimas y máximas dentro del perfil en profundidad son absolutamente despreciables a los efectos prácticos.

Efecto espejo (Lloyd mirror)

La dependencia de la propagación con la frecuencia debido a la interferencia destructiva de ondas también forma una parte importante del proceso de debilitamiento del ruido.

Incluso las amplitudes cerca de la superficie en aguas poco profundas pueden reducirse significativamente por la interferencia con la onda superficial reflejada, efecto denominado “Lloyd mirror” (Gordon et al., 2003).

En la Figura 3 se ilustra la comparación entre el resultado del Lloyd mirror (línea llena) con la expansión esférica (línea punteada). Las tendencias de TL son proporcionales a $10 \log(R^4)$ en el primer caso y a $10 \log(R^2)$ en el segundo. La denominación se debe a que el rayo reflejado se representa geoméricamente a través de una fuente ficticia ubicada “en espejo” por encima de la superficie del agua.



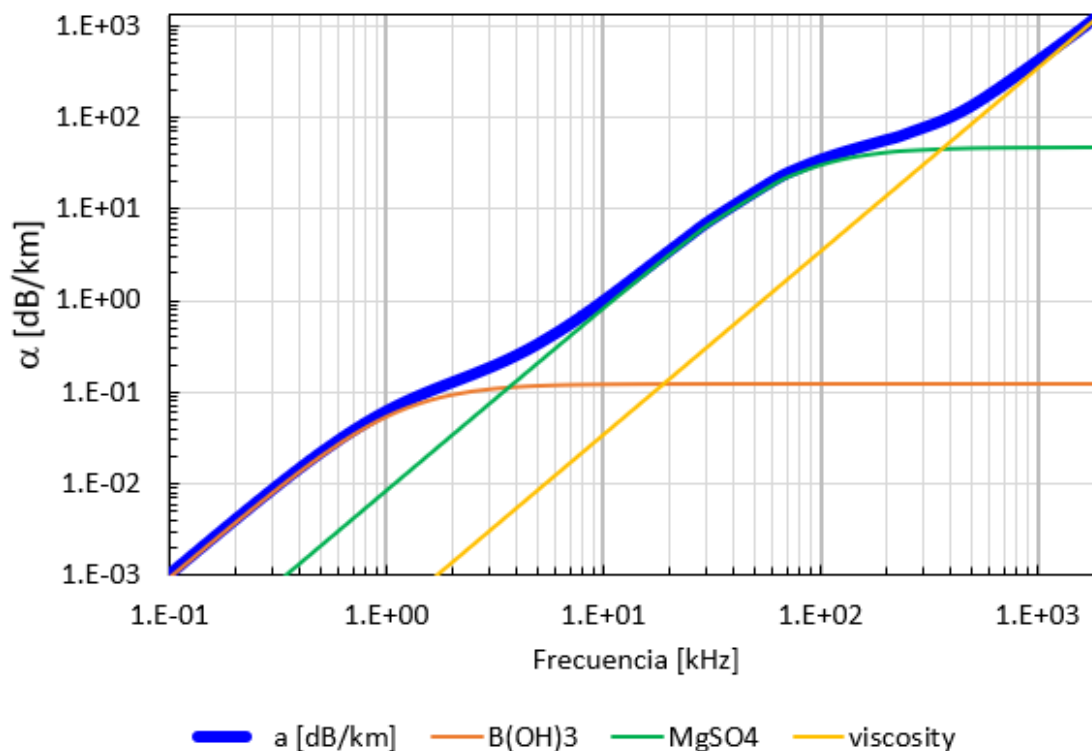


Figura 2. Pérdidas por absorción en función de la frecuencia según la dominancia del Ácido Bórico ($B(OH)_3$), moléculas de Sulfato de Magnesio ($MgSO_4$) y Viscosidad.

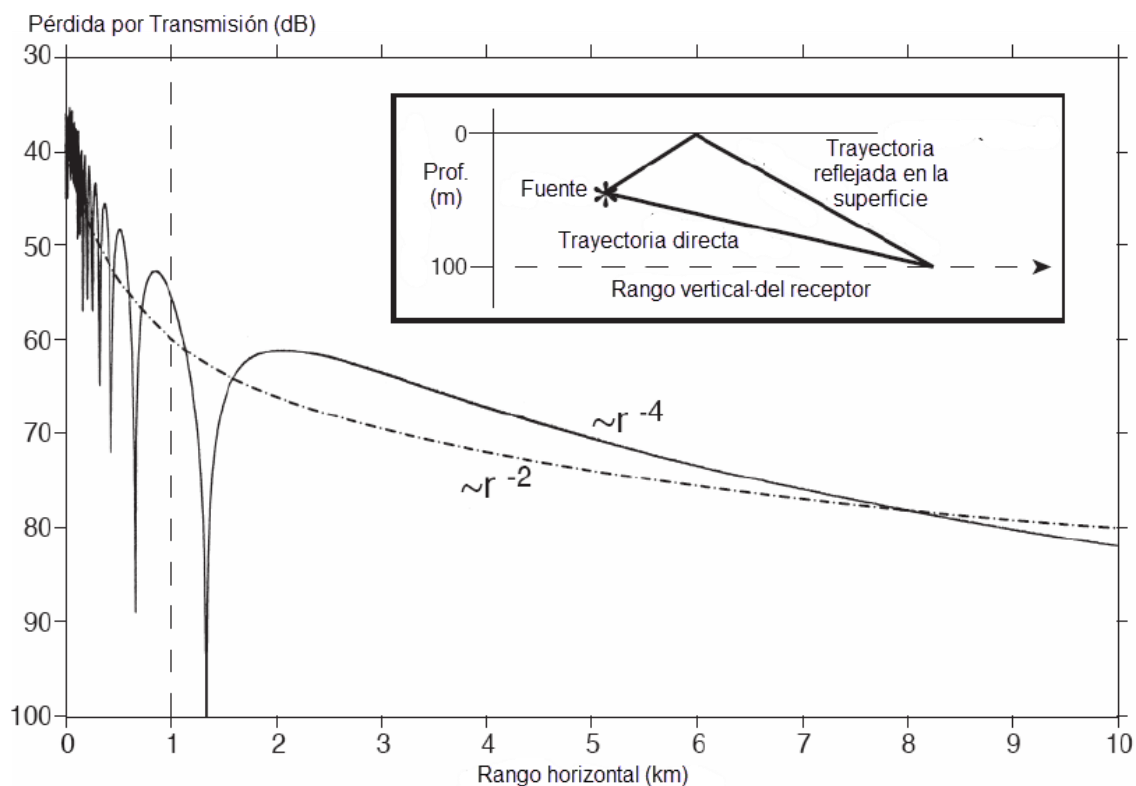


Figura 3. Efecto espejo por reflexión en la superficie. Adaptado de Kuperman (2007)

[Signature]

Reflexión y refracción en el lecho marino

El rebote del sonido en el fondo marino puede extender el alcance de propagación de las ondas sonoras. El efecto de estos rebotes devuelve la energía sonora que había sido llevada hasta allí por refracción a través del agua, permitiendo transmisiones de mayor alcance.

A bajas frecuencias, parte de la energía penetra en la capa de sedimentos del fondo del mar y desde aquí es refractada de nuevo a la frontera entre el agua y el fondo del mar, donde vuelve al agua. Esta refracción desde el fondo marino, que no es una reflexión, es mecanismo predominante de retorno de energía. A frecuencias medias o altas (mayores de 1000 Hz), la reflexión es el mecanismo predominante de retorno de energía ya que la onda es reflejada en la capa de sedimentos del fondo marino sin penetrar en ella.

Los principales factores que afectan a la transmisión por rebotes en el fondo son la frecuencia del sonido, la profundidad del agua, el ángulo de incidencia y la composición y relieve del fondo marino.

Canales sónicos

Un canal sónico se produce cuando se combinan dos gradientes de velocidad del sonido de igual pendiente. Uno positivo y el otro negativo.

Su confluencia se producirá en un punto de velocidad mínima. Si la fuente sonora emitiera en esta profundidad, todos los rayos sonoros que salen con un ángulo sobre la horizontal serían curvados hacia abajo y los que salen hacia abajo se curvarían hacia arriba, en esta situación simétrica un rayo que salga hacia abajo se elevará tanto por encima de la profundidad de origen como la que bajó. Cuando se produce una condición como esta se produce el canal sónico y la profundidad de mínima velocidad se denomina "eje del canal". El sonido permanecerá en el canal mientras el mismo exista y sufrirá pérdidas muy pequeñas a medida que avanza. Dado que los rayos siempre tienden a curvarse hacia la profundidad donde exista la menor velocidad de propagación, seguirán un camino oscilante que se asemeja a una onda sinusoidal. Estos canales pueden producirse en superficie, ser intermedios, de aguas poco profundas o de aguas profundas.

Dentro de los canales sónicos profundos se encuentran cáusticos y zonas de convergencia, en los cuales se propaga el sonido con muy pocas pérdidas. En un diagrama del rayo, un caustico es la envolvente formada por la intersección de rayos adyacentes. Cuando un caustico intercepta la superficie del mar, la zona donde esto sucede es conocida como zona de convergencia. Dado que la profundidad de emisión de los arreglos es muy cercana a la superficie, no se espera que se produzcan canales sónicos profundos, aunque podrían generarse canales en superficie.

Estas particularidades, que se ilustran en la figura siguiente, se revelan en las modelizaciones matemáticas de la Pérdida por Transmisión por la visualización de una zona de mínima pérdida que se produce a una profundidad dada.



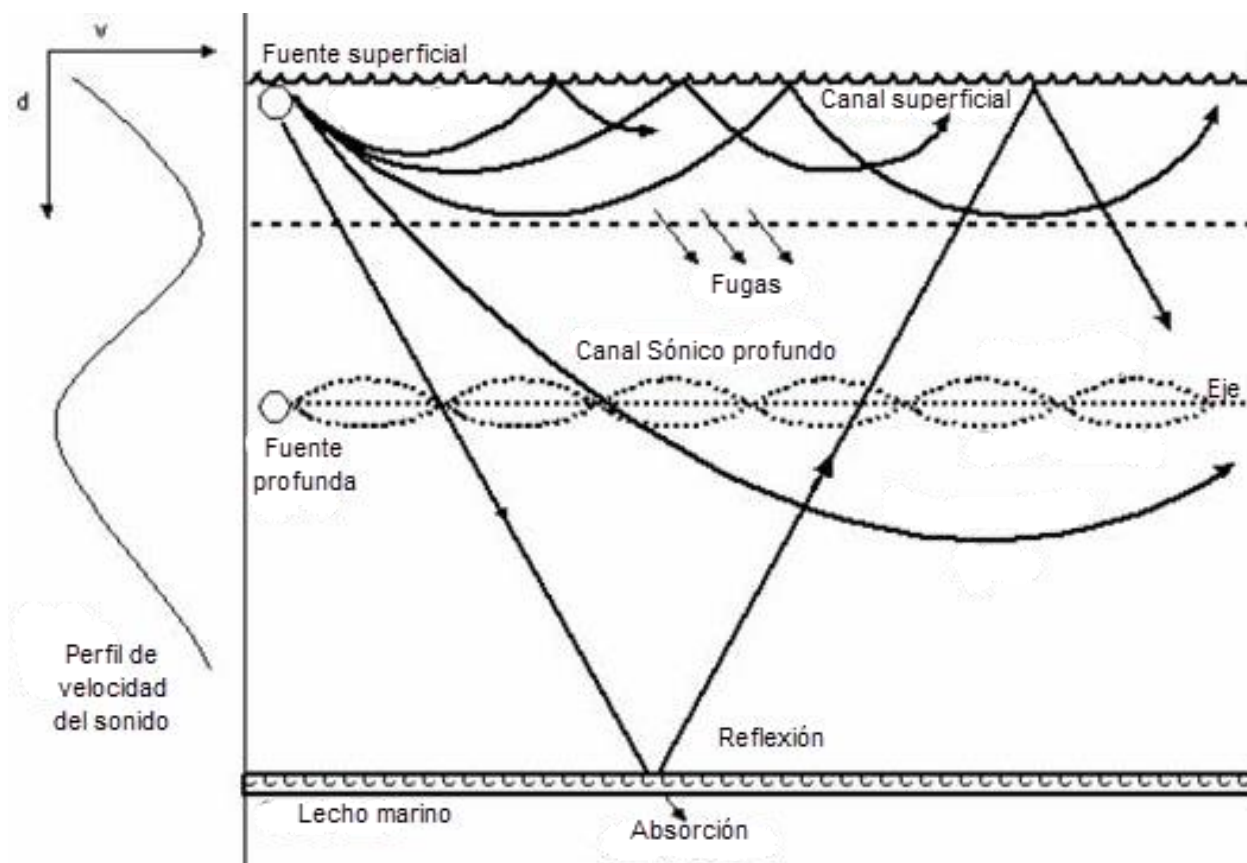


Figura 4. Canales sónicos.

Nivel recibido

A partir del espectro de energía de sonido o nivel de Exposición Sonora (SEL) para una dada frecuencia a 1 m de la fuente, denominado SL (Source Level en dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ re 1 m) y conociendo la Pérdida de Transmisión TL (R) (dB re 1 m) a una cierta distancia R de la fuente, el nivel de SEL recibido, denominado RL, se puede calcular mediante la siguiente expresión simple:

$$\text{RL (dB re } 1\mu\text{Pa}^2 \text{ s/Hz re 1 m)} = \text{SL} - \text{TL (R)} \quad [5]$$

Esta expresión es válida también para evaluar el Nivel de Presión Acústica SPL a la distancia R de la fuente, a partir del valor a 1 metro.

1.2 MODELOS MATEMÁTICOS

Existen diversos modelos numéricos disponibles para el cálculo de la propagación acústica. Estos incluyen el trazado de rayos, el modo normal y los modelos de ecuación parabólica. Cada uno tiene sus propias fortalezas y debilidades.

Algunos modelos son más adecuados para aguas poco profundas, otros para aguas profundas, algunos pueden lidiar con complejos perfiles de batimetría, otros requieren una profundidad de agua fija, algunos devuelven perfiles de intensidad de sonido vertical a través de la columna de agua, algunos pueden manejar ondas de corte, otros no.

La elección del modelo de propagación depende del medio ambiente en cuestión. Para caracterizar una fuente con complejos componentes de frecuencia, como son los arreglos sísmicos, el modelo elegido debe ejecutarse a varias frecuencias (McCauley et al, 2000).

El documento IF-2019-95887938-APN-DIAEE#SGP, “Anexo IV: Estructura y Contenidos del Estudio de Impacto Ambiental para Proyectos de Exploración Asociados a Actividades de Adquisición Sísmica”, indica: “Respecto del impacto acústico, evaluar los impactos de la propagación del sonido y las pérdidas por transmisión, en base a la modelación numérica considerada (ej. BELLHOP Ray Beam Model, otros)”. Considerando el rango de validez del modelo de BELLHOP basado en teoría de rayos (Wang, 2014), resulta que el mismo no es aplicable, desde el punto de vista acústico en la totalidad del escenario bajo estudio, a emisiones de baja frecuencia y de aguas profundas.

El modelo empleado para la simulación acústica es el Range-Dependent Acoustic Model “RAM” (Jensen et al., 1994), el cual utiliza el método de la ecuación parabólica (PE), siendo muy efectivo para resolver problemas de acústica oceánica que dependan del rango (es decir, que sean espacialmente variables). El (RAM) es un programa que usa las últimas técnicas en modelado de PE. La interfase empleada para correr el modelo es la “Acoustic Toolbox User Interface and Post processor” (AcTUP V2.2L).

RAM utiliza un algoritmo de Padé de pasos divididos para lograr una alta eficiencia y la capacidad de modelar la propagación en ángulos grandes desde la horizontal (la limitación habitual de los códigos PE). Existe una compensación entre el rango angular y la velocidad de cálculo que se rige por la cantidad de términos que el usuario especifica para la aproximación de Padé: cuantos más términos, más amplio es el ángulo, pero más lento se ejecuta el código.

RAM es apropiado para modelar la propagación de señales de baja frecuencia en entornos totalmente dependientes del rango (es decir, batimetría y velocidad del sonido dependientes del rango) incluyendo aguas profundas. Los parámetros que ingresan al modelo se relacionan principalmente con las propiedades acústicas del medio en el cual el sonido se propaga, tanto en agua como en los sedimentos del fondo marino.



2 **UMBRALES DE ATENUACIÓN ACÚSTICA RELACIONADOS CON LA AFECTACIÓN DE MAMÍFEROS MARINOS Y PECES**

En el párrafo 2.1.1 “Antecedentes de los potenciales efectos sobre la biota marina asociados a la emisión de energía sonora” del Capítulo 5 y en el punto 4 del Capítulo 7 sobre Evaluación de Impactos Ambientales se presenta en detalle el tema del impacto del sonido sobre los mamíferos marinos y peces, por lo que a los efectos de no repetir los conceptos, se hace referencia al mismo para las descripciones detalladas correspondientes.

No obstante, a los efectos de introducir adecuadamente los diferentes umbrales sonoros que pueden provocar pérdidas auditivas que son consideradas en el capítulo de evaluación de impactos, y a fin de definir las distancias sonorizadas con valores superiores a ellos, a continuación se resumen los mismos.

Estos umbrales corresponden a pérdidas auditivas de los mamíferos marinos denominadas desplazamientos de umbrales (Threshold shift, TS), que pueden ser permanentes (PTS) o temporales (TTS).

- El desplazamiento permanente del umbral (PTS) es un aumento permanente e irreversible del umbral de audibilidad a una frecuencia o porción específica del rango de audición de un individuo por encima de un nivel de referencia previamente establecido. Esto se considera una lesión auditiva.
- El desplazamiento temporal del umbral (TTS) es un aumento temporal y reversible del umbral de audibilidad a una frecuencia o porción específica del rango de audición de un individuo por encima de un nivel de referencia previamente establecido.

En el caso de los peces, se consideran los valores umbrales de sensibilidad propuestos para peces con y sin vejiga natatoria, correspondientes al nivel de mortalidad o mortalidad potencial.

Conforme a lo propuesto por Southall (2019) se considera una “métrica” dual para definir los umbrales de afectación, correspondiente a los valores de SPL pico (ecuación [1] Capítulo 4), cuyo valor total es 255,2 dB re 1µPa-m (ecuación [8] Capítulo 4), y a los valores de SEL (ecuación [4] Capítulo 4), acumulados durante un cierto período de exposición a las emisiones sonoras.

Los códigos empleados para diferenciar los grupos auditivos de los mamíferos marinos se resumen en la siguiente tabla, y se detallan en el capítulo de evaluación de impactos.

Tabla 1. Grupos auditivos con sus rangos de audición

Código	Grupo	Rango auditivo generalizado
LF	Cetáceos de frecuencias bajas	7 Hz a 35 kHz
HF	Cetáceos de frecuencias altas	150 Hz a 160 kHz
VHF	Cetáceos de frecuencias muy altas	275 Hz a 189 kHz
PW	Carnívoros Fócidos	50 Hz a 86 kHz
PO	Pinnípedos Otáridos y otros carnívoros	60 Hz a 39 kHz

Para estimar el SEL acumulado en las sucesivas emisiones, se “pondera” el valor del SEL emitido restando el nivel correspondiente a la capacidad auditiva de cada especie de mamíferos marinos.



Las funciones de audición (audiogramas) de las diferentes especies propuestas por el National Marine Fisheries Service (2016), tienen la siguiente forma:

$$G(f) = K + 10 \log_{10} \left[\frac{(f/f_{lo})^{2a}}{[1 + (f/f_{lo})^2]^a [1 + (f/f_{hi})^2]^b} \right] \quad [6]$$

Donde $G(f)$ es la amplitud de la función de peso (en dB) a una frecuencia f (en Hz).

La revisión efectuada por el Marine Fisheries Service (2018) cambia la nomenclatura denominando C a la variable K de la fórmula anterior, y $W_{aud}(f)$ (por “auditory weighting function”) a la función de peso $G(f)$, f_1 a la frecuencia de corte baja f_{lo} y f_2 a la frecuencia de corte alta f_{hi} , quedando la siguiente expresión, en la cual todos los coeficientes y valores correspondientes son idénticos.

$$W_{aud}(f) = C + 10 \log_{10} \left\{ \frac{(f/f_1)^{2a}}{[1 + (f/f_1)^2]^a [1 + (f/f_2)^2]^b} \right\} \quad [7]$$

Los coeficientes de la fórmula de cálculo se presentan en la Tabla 2 (empleando ambas nomenclaturas) y en la Figura 5. El rango de frecuencias donde su valor es prácticamente nulo es aquel en que la audición es óptima.

Tabla 2. Coeficientes de la formulación de cálculo de los Audiogramas por especie (Southall, 2019 y NMFS, 2018)

Grupo Auditivo		a	b	f_{lo} o f_1 (Hz)	f_{hi} o f_2 (Hz)	C o K(dB)
LF	Cetáceos de frecuencias bajas	1,0	2,0	200	19.000	0,13
HF	Cetáceos de frecuencias altas (o “medias”)	1,6	2,0	8.800	110.000	1,20
VHF	Cetáceos de frecuencias muy altas (o “altas”)	1,8	2,0	12.000	140.000	1,36
PW	Carnívoros Fócidos	1,0	2,0	1.900	30.000	0,75
PO	Pinnípedos Otáridos y otros carnívoros	2,0	2,0	940	25.000	0,64

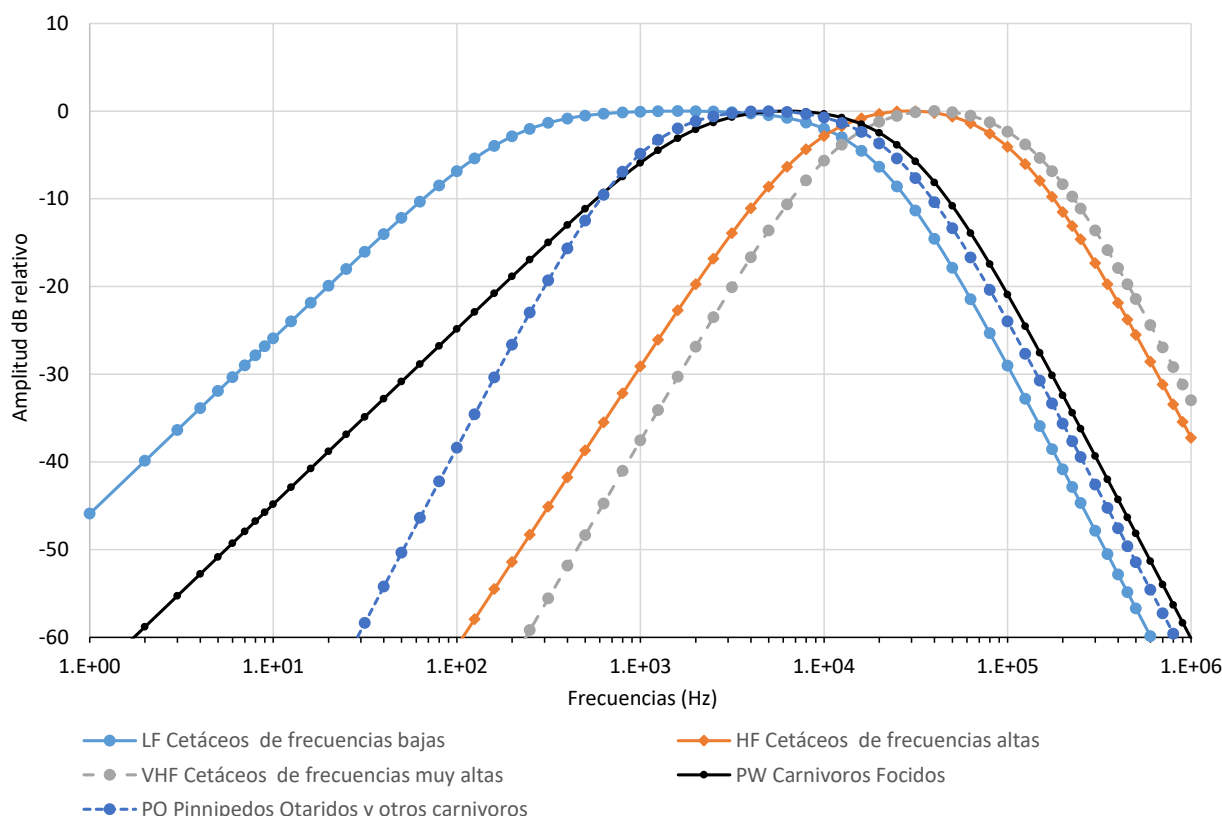


Figura 5. Funciones de peso (audiogramas) para diferentes especies

La Tabla 3 presenta los valores de sonidos a partir de los cuales se pueden verificar situaciones de impacto auditivo por corrimiento temporario (TTS) o permanente (PTS) de los umbrales auditivos. SPL pk (SPLpeak) es el criterio de exposición mínima para las lesiones en los mamíferos, nivel en el que se estima que una sola exposición causa el corrimiento de los umbrales auditivos, y SELcum se refiere a la energía sonora que se acumula durante un periodo de tiempo para un receptor con exposiciones múltiples.

Como se mencionó previamente, para fuentes móviles y de emisión intermitente se usan ambas: superar cualquiera de esos niveles es condición suficiente para predecir TTS o inicio de PTS. Estos valores también se usan para estimar distancias seguras, es decir distancias de la fuente para la cual no se supera un umbral determinado, usando la isolínea que da la distancia mayor para el conjunto de grupos que pueden ser potencialmente impactados.



Tabla 3. Niveles de PTS y TTS para los distintos grupos auditivos. Fuentes: Southall et al 2019. Para SPL (pK) se suelen usar valores no ponderados. Para SEL las ponderados son en base al rango generalizado de audición para mamíferos marinos de 7 Hz to 160 kHz. En el caso de SEL se considera una acumulación de 24 horas o durante la duración real de la exposición.

Código	Grupo auditivo	Inicio PTS		Inicio TTS	
		SPL pK ¹ (no ponderado)	SELcum ² (ponderado)	SPL pK ¹ (no ponderado)	SELcum ² (ponderado)
LF	Cetáceos de frecuencias bajas	219	183	213	168
HF	Cetáceos de frecuencias altas	230	185	224	170
VHF	Cetáceos de frecuencias muy altas	202	155	196	140
PW	Carnívoros Fócidos	218	185	212	170
PO	Pinnípedos Otáridos y otros carnívoros	232	203	226	188

¹ SPL pK (L_p,0-pk,flat) Re: 1 µPa (flat: valores sin ponderar)
² SELcum (LE,p, 24h) Re: 1µPa²s (valores ponderados en 24 hs o durante la duración real de la exposición)

Se puede apreciar que la categoría más exigente son los cetáceos de frecuencias muy altas (VHF), si bien su rango auditivo se encuentra por encima de las frecuencias con mayor intensidad sonora emitidas durante los relevamientos sísmicos, que van de 5 a 90 Hz.

En cuanto a los peces, conforme se expresa en el Capítulo 7, se adoptaron los siguientes umbrales de mortalidad potencial y de recuperación (Popper et al. 2014):

Grupo Auditivo	SPL pK (dB re 1 µPa)
Peces SIN vejiga natatoria	213
Peces CON vejiga natatoria ¹	207

¹ Comprende peces con vejiga natatoria no conectada al oído y con vejiga natatoria conectada al oído



3 PROCEDIMIENTO DE AUMENTO GRADUAL DE LA EMISIÓN Y RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE SPL Y DE SEL

La Resolución 201/2021, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, aprueba y establece un Protocolo para la implementación del monitoreo de fauna marina en prospecciones sísmicas, el cual debe ser incluido dentro de un programa específico del Plan de Gestión Ambiental (PGA), que en su Capítulo 6 incluye medidas y procedimientos para la mitigación de impactos.

Una de las medidas de mitigación que se aplican en las prospecciones sísmicas es el denominado habitualmente “Arranque Suave” (“Soft Start” o “ramp up”), que es especificado en la citada Resolución como “procedimiento de aumento gradual”, el cual consiste en iniciar los pulsos sísmicos a baja intensidad de forma que la fauna marina con capacidad de locomoción tenga oportunidad de alejarse de la fuente de ruido mientras que la perturbación del medio es de baja intensidad. El aumento gradual de la intensidad del pulso sísmico debe iniciarse con la activación del elemento más pequeño del arreglo y los restantes se debe agregar gradualmente. Su duración mínima debe ser de 20 minutos y no debe exceder los 40 minutos.

Debido a la naturaleza logarítmica del sonido y al complejo patrón de interferencia entre las fuentes individuales, la superposición del sonido al comenzar la emisión de cada fuente no genera una rampa de crecimiento lineal.

A los efectos de simular lo más adecuadamente posible el procedimiento de aumento gradual, se calculó mediante el Software Nucleus la evolución del SPL_{peak} y del SEL con incrementos sucesivos de la cantidad de fuentes individuales energizadas, a una distancia de 9 km de la fuente (asumiendo expansión geométrica esférica), y se llevaron estos valores a una distancia teórica de 1 m de la “fuente” (el arreglo), sumando la Pérdida por Transmisión teórica correspondiente, igual a $20 \log(9000) = 79,085 \text{ dB}$. Cabe mencionar que si se realiza el mismo cálculo con Nucleus asumiendo expansión cilíndrica, y se suma la corrección $10 \log(9000) = 59,542 \text{ dB}$, se obtienen los mismos valores.

Las figuras siguientes ilustran los valores de SPL_{peak} y SEL obtenidos a 9 km de distancia.

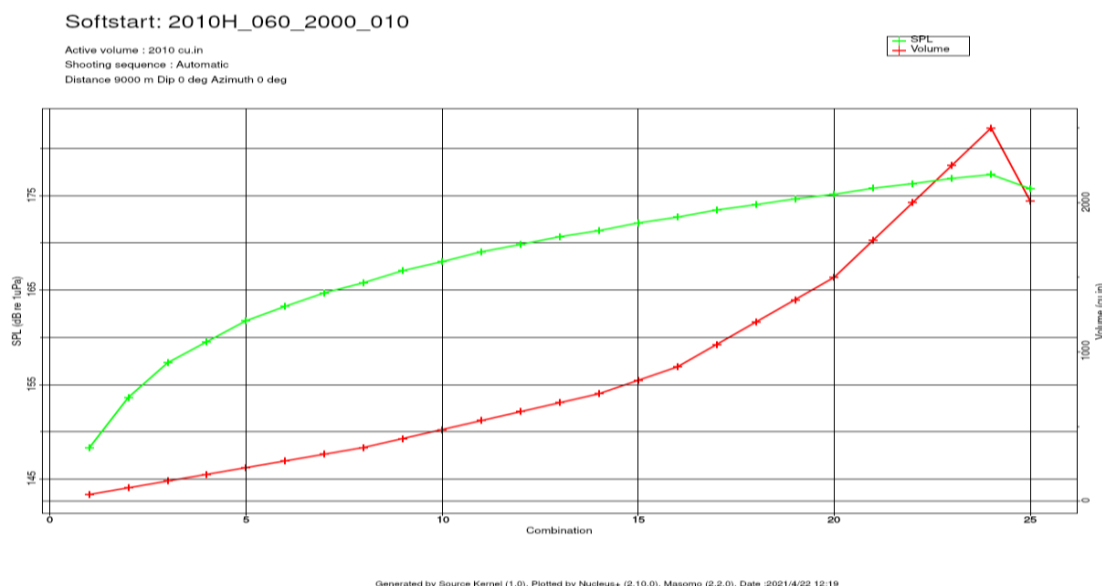


Figura 6. Evolución del volumen de emisión y del SPL_{peak} resultante durante el procedimiento de aumento gradual



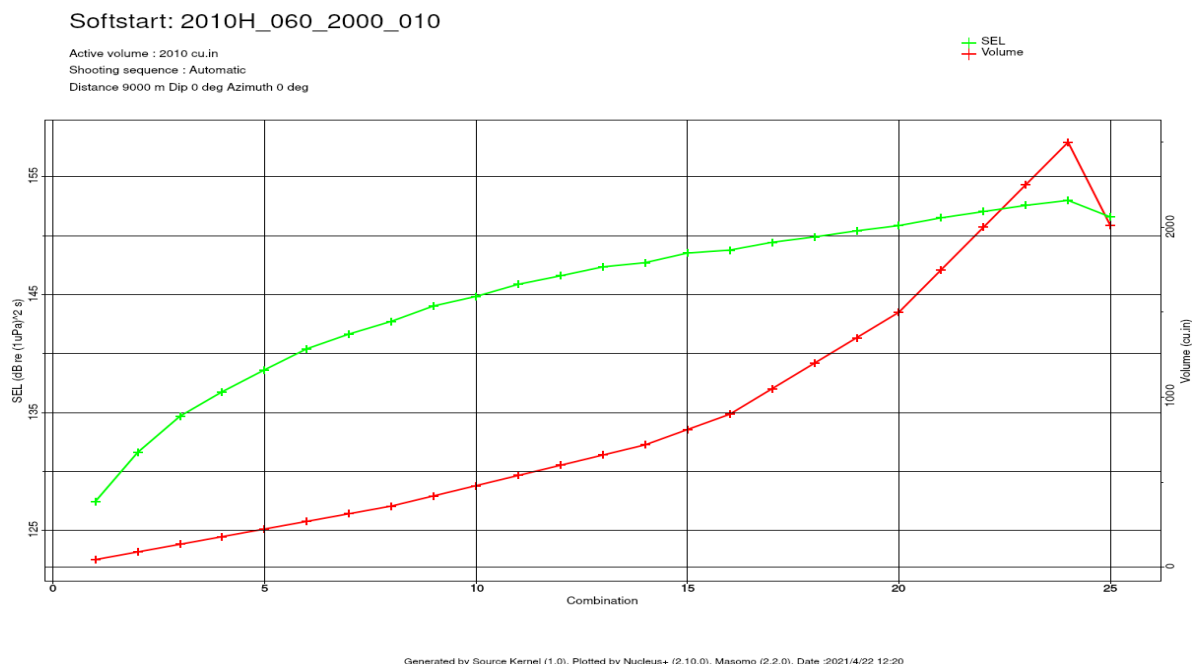


Figura 7. Evolución del volumen de emisión y del SEL resultante durante el procedimiento de aumento gradual

La razón por la que el volumen se reduce en el paso o combinación N° 25 con respecto a la N° 24, es que se simula en este caso la energización de las dos fuentes de repuesto a modo de verificación de su funcionamiento, alcanzando transitoriamente un volumen de 2.500 pulgadas cúbicas de volumen (40,97 litros), según se puede apreciar en la Figura 9. “Arreglo emisor de fuentes de energía de aire comprimido” del Capítulo 4. Estas dos fuentes de repuesto luego son apagadas durante la prospección.

Los resultados del software Nucleus fueron procesados para su interpretación, presentándose en la Figura 8 los valores de SEL y SPLpeak, y la diferencia entre ambos en decibeles.



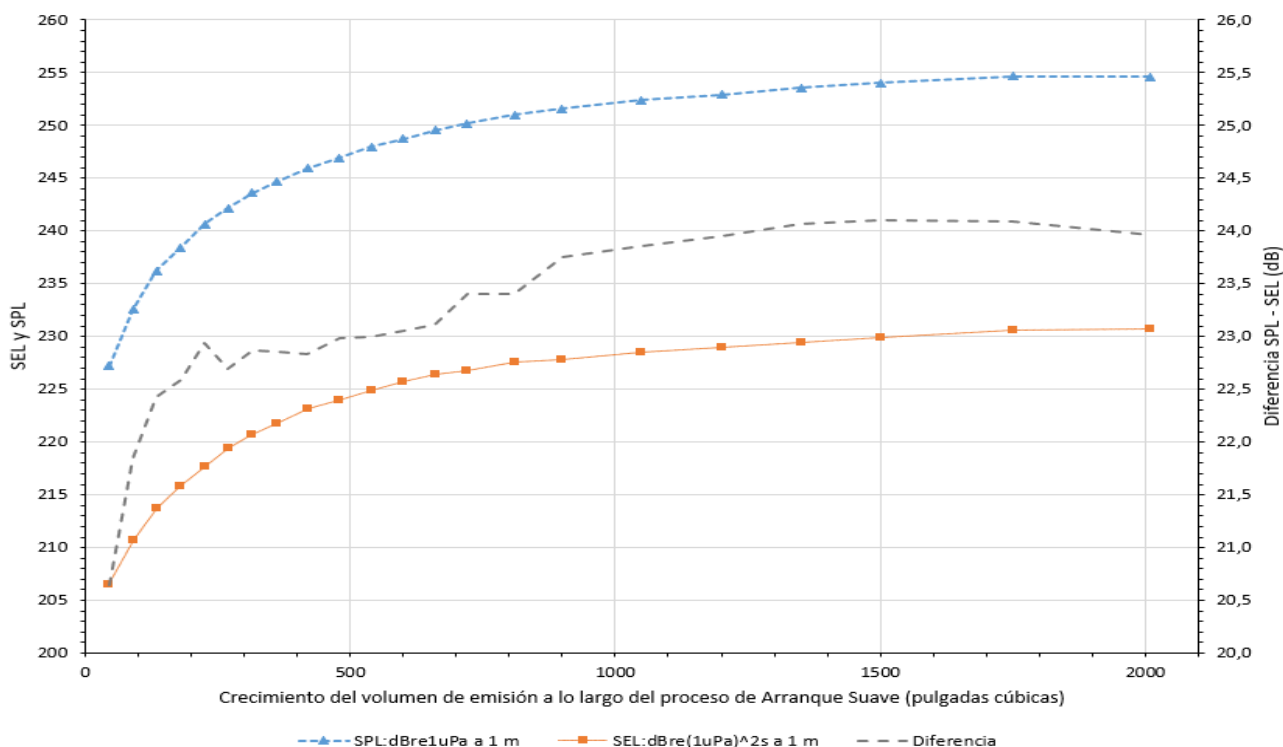


Figura 8. Evolución del SPL y SEL resultantes del incremento del volumen de emisión durante el procedimiento de aumento gradual. Notar que las unidades de cada variable son diferentes.

Debe recordarse lo expresado en el acápite 2.9.2.1 del Capítulo 4 donde se indica que si bien las unidades del SEL y del SPL_{peak} son diferentes, el valor numérico del SEL es típicamente de 20 a 25 dB inferior a SPL_{peak}. Asimismo, el cálculo presentado en el acápite 2.9.3 del Capítulo 4 muestra que la diferencia entre el valor “nominal” del SEL total emitido verticalmente (230,69 dB re 1 μPa^2 s a 1 m), calculado integrando el espectro de energía correspondiente, y el valor total del SPL_{peak} calculado previamente a partir de la emisión en Bar.m del arreglo (254,6 dB re 1 μPa a 1 m), es igual a unos 23,9 dB.

El valor total del SEL obtenido por el software Nucleus al final del proceso de aumento gradual es igual a 230,67 dB re 1 μPa^2 s a 1 m (prácticamente igual al obtenido integrando el espectro de energía), y el valor total del SPL es 254,63 dB re 1 μPa a 1 m. La diferencia entre ambos valores es igual a 23,96 dB al final del proceso, alcanzando un máximo de 24,10 dB en la combinación 20 cuando se han activado 1.500 cu.in de volumen.

En consecuencia, se realizará todo el proceso de propagación sonora considerando el SEL, y se estimará luego el SPL_{peak} incrementando conservativamente en 24 dB el valor del SEL que se obtenga para cada distancia.



4 **MODELACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE LA INTENSIDAD SONORA (SPL)**

A continuación se presentan los parámetros del medio utilizados para las modelizaciones matemáticas. Los parámetros de emisión empleados son los presentados en el Capítulo 4 de Descripción del Proyecto.

4.1 **BATIMETRÍA**

La información batimétrica del área de modelación fue obtenida de la base de datos GEBCO (The General Bathymetric Chart of the Oceans)¹.

4.2 **DIRECTIVIDAD DE LA FUENTE**

Se especificó que el primer haz salga horizontalmente (esto es el ángulo de salida es 0°) desde la posición del arreglo, a 6 m de profundidad. Cualquier otro ángulo de salida del primer haz generará pérdidas mayores con la distancia.

4.3 **ÉPOCA PREVISTA PARA EL RELEVAMIENTO**

El presente estudio fue diseñado de manera que los resultados de este sean aplicables a cualquier época del año. No obstante, se considera que la prospección no será efectuada durante los meses de invierno, debido a las condiciones climáticas desfavorables.

4.4 **DATOS OCEANOGRÁFICOS**

Para la selección de los distintos perfiles de temperatura y salinidad del área, que dan lugar a respectivos perfiles de densidad y velocidad del sonido de la columna de agua, se tuvieron en cuenta dos fuentes. Una es el modelo GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024 de Copernicus, el Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea. La otra, la base de datos oceanográfica World Ocean Database -WOD- (<http://www.nodc.noaa.gov>) de la NOAA.

En el Anexo 1 del presente Capítulo 6 se ilustran los perfiles de temperatura y salinidad descargados de la base Copernicus, y los perfiles de velocidad del sonido y densidad del agua calculados para diferentes meses del año y 3 puntos a diferentes profundidades y ubicación geográfica, representativos del entorno del relevamiento.

A partir de estos datos, se calcularon perfiles de velocidad del sonido y densidad, que son datos de entrada para los modelos acústicos. La velocidad del sonido fue calculada mediante la aplicación de la Ecuación Termodinámica del agua de mar "Thermodynamic Equation Of Seawater - 2010" (TEOS-10; <http://www.teos-10.org/>).

4.5 **SEDIMENTOS MARINOS**

Los datos de sedimentos del fondo marino se obtuvieron del Atlas de Sensibilidad del Mar Argentino (Boltovskoy et al., 2008). La plataforma continental tiene una cobertura de sedimentos recientes originados en el continente y llevados al mar a través de diferentes procesos de transporte y depositación. No hay sedimentos originados en el mar. En la Figura 9 se presentan los sedimentos superficiales para el área de estudio.

¹ <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco/>

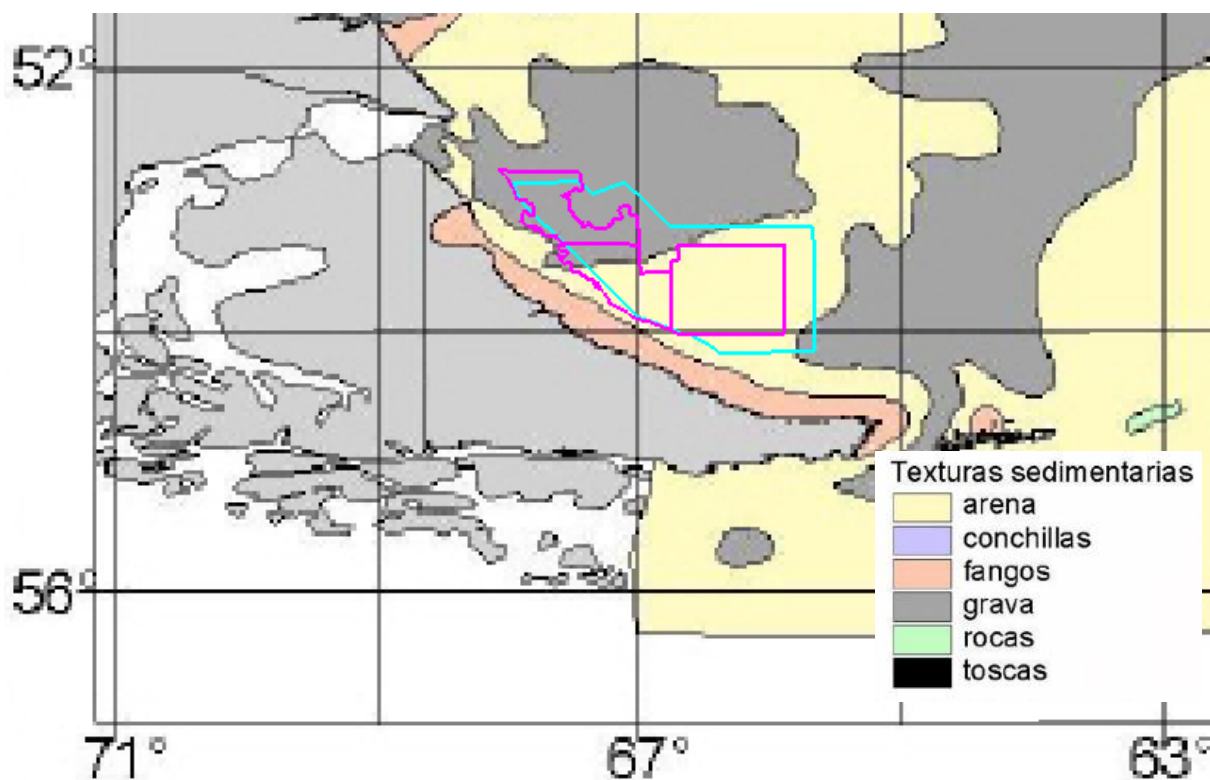


Figura 9. Capa de sedimentos de fondo marino para el área de exploración sísmica. Polígonos rosas: áreas de concesión; polígono celeste: área de operación.

Con respecto al sedimento subyacente, en base a los antecedentes disponibles se lo caracterizó como una Morena (Moraine).

Los detalles sobre los parámetros empleados para el análisis de sensibilidad y para la modelización final se brindan en el Anexo II.

4.6 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN MÍNIMA

Las simulaciones efectuadas con el modelo RAM generan matrices bidimensionales de TL, con espaciamientos Dz y Dx en las dimensiones vertical (z) y horizontal (x), respectivamente.

En todos los casos, se consideró $Dz = 1$ m, mientras que en la dirección horizontal también se empleó $Dx = 1$ m en general, aunque de acuerdo con la frecuencia en algunos casos se consideró un valor de Dx algo mayor y luego se interpolaron los resultados cada 1 metro para uniformizar la longitud de las series.

En la dirección vertical dentro del agua la cantidad de puntos es igual a la profundidad. En la dirección horizontal se consideraron 25.000 metros desde la fuente para las comparaciones de sensibilidad y los cálculos siguientes de acumulación del SEL.

Se cuenta entonces para analizar una matriz resultante $TL(z,x)$ con dimensiones $(P, 25.000)$, donde P es la profundidad de agua en el dominio de modelación (la cual puede ser un valor uniforme o bien el valor máximo de $P(x)$ en caso de batimetría variable)

De la Figura 10 a la Figura 12 se ilustra un resultado típico bidimensional para cada una de las tres condiciones de profundidad con perfil oceanográfico de Primavera para una frecuencia de 125 Hz.



La Figura 13 muestra como ejemplo para los procesamientos de la matriz para obtener el mínimo TL en vertical (denominado $TL_V(x)$) y luego el mínimo TL también en función de la distancia horizontal (denominado $TL_{V,H}(x)$), que finalmente se presenta en la Figura 14. Los gráficos parten de una distancia de 50 m desde la fuente dado que los resultados del Modelo RAM no resultan confiables para distancias menores, además de que no son representativos de la realidad dado que la fuente no es puntual y a corta distancia de esta la intensidad real del conjunto de las fuentes es menor que la resultante donde todas las emisiones se combinan constructivamente.

El valor de $TL_V(x)$ muestra la variabilidad del valor mínimo de TL en toda la columna de agua para una dada distancia “x” a la fuente, por lo tanto, no se refiere a una profundidad o capa en particular, sino que es el valor más pequeño que pueda hallarse en cualquier profundidad entre la superficie y el lecho, lo cual claramente es la hipótesis más conservativa posible.

El valor de $TL_{V,H}(x)$ elimina las oscilaciones que se aprecian en $TL_V(x)$, generando una envolvente “superior” que representa el valor más bajo (conservativo) de TL que puede encontrarse para cada distancia “x” desde la fuente, desde esa distancia “x” en adelante, hasta los 25.000 m.

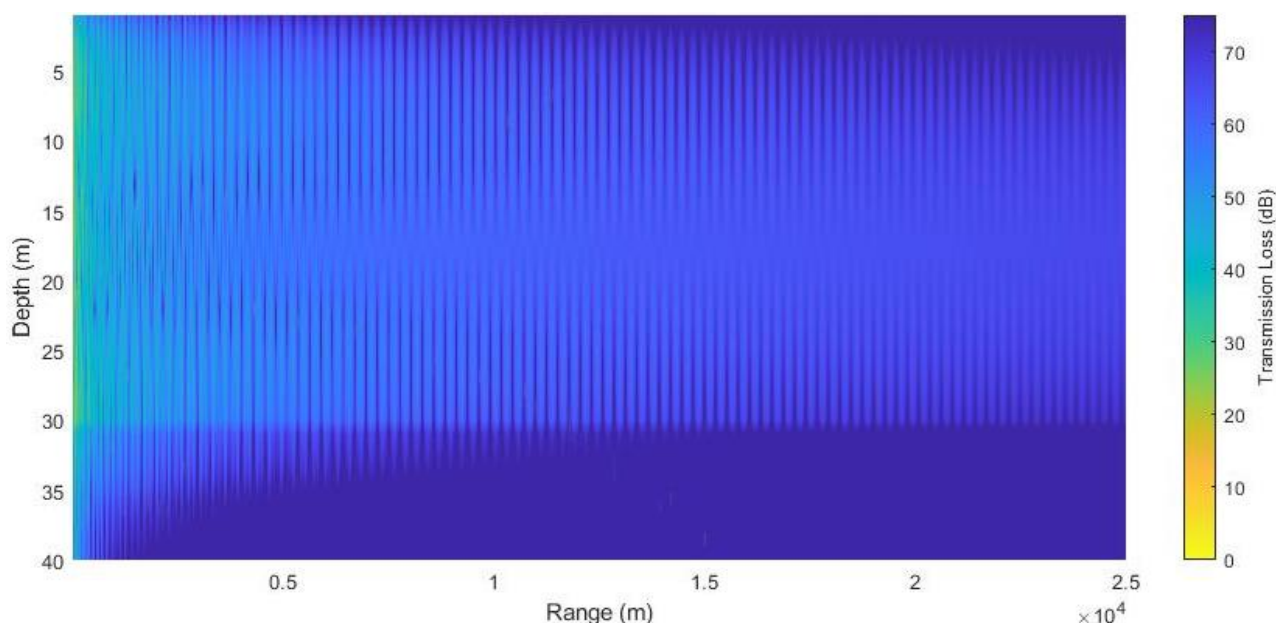


Figura 10. Ejemplo de matriz bidimensional (representación 2D) de la Pérdida de Transmisión para una frecuencia de 125 Hz calculada por el modelo RAM. Profundidad mínima Uniforme (B0)

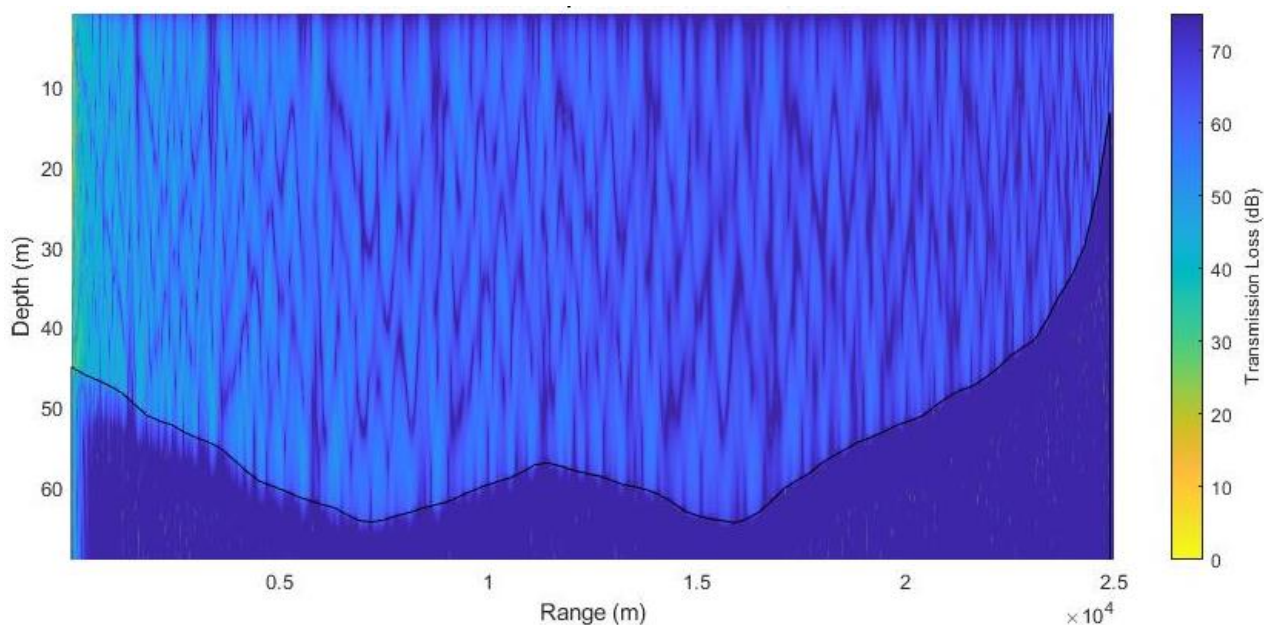


Figura 11. Ejemplo de matriz bidimensional (representación 2D) de la Pérdida de Transmisión para una frecuencia de 125 Hz calculada por el modelo RAM. Profundidad variable Transecta 8 (BV8)

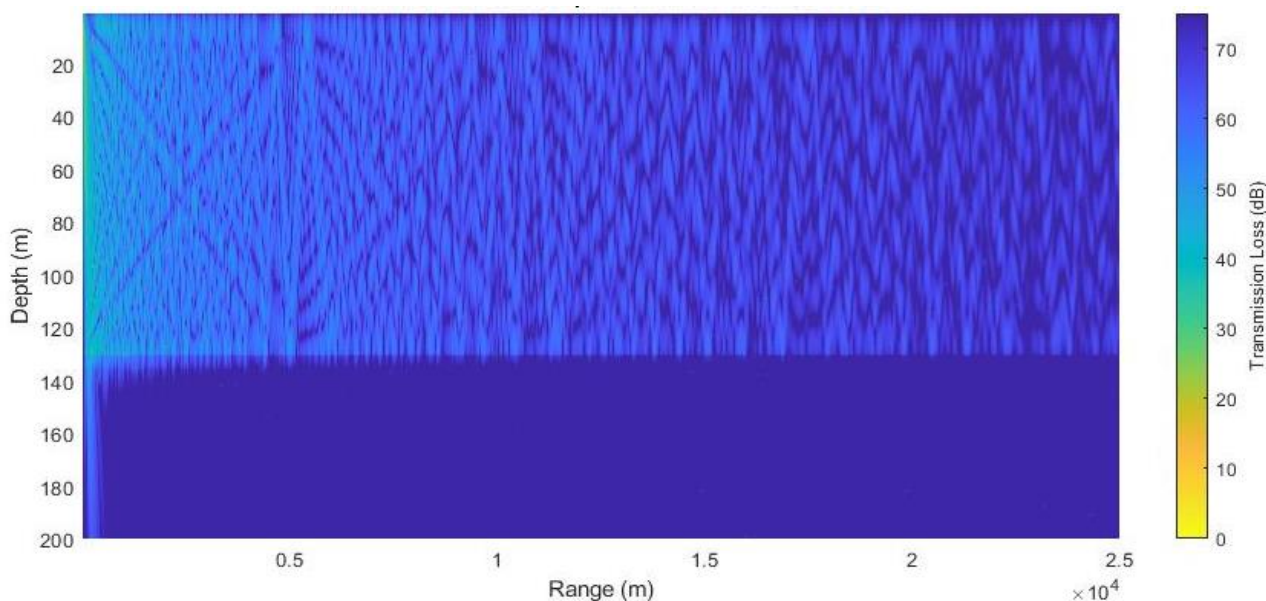


Figura 12. Ejemplo de matriz bidimensional (representación 2D) de la Pérdida de Transmisión para una frecuencia de 125 Hz calculada por el modelo RAM. Profundidad máxima Uniforme (BA)



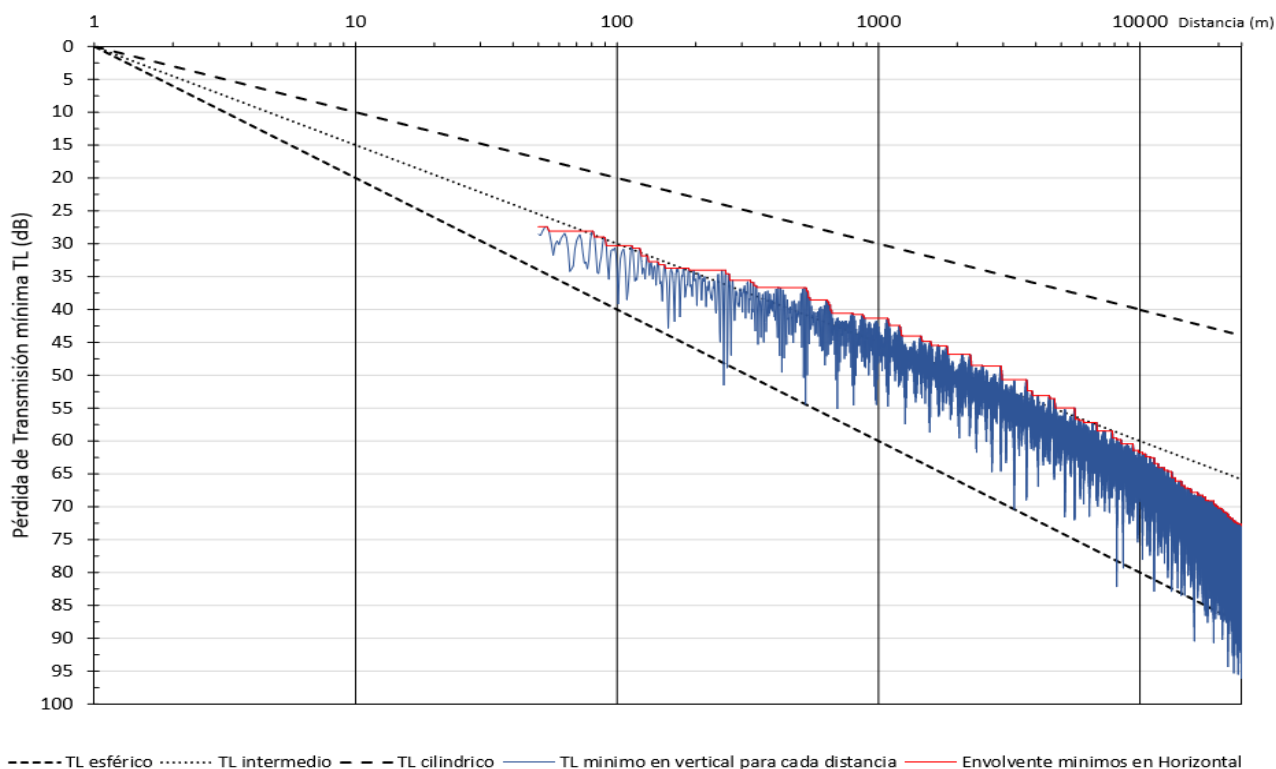


Figura 13. Ejemplo de procesamiento de la matriz bidimensional de TL calculada por el modelo RAM para obtener la Pérdida de Transmisión mínima en vertical (línea azul oscilante) y la envolvente de mínimos en horizontal (línea roja). Frecuencia 125 Hz. Profundidad variable Transecta 8 (BV8)

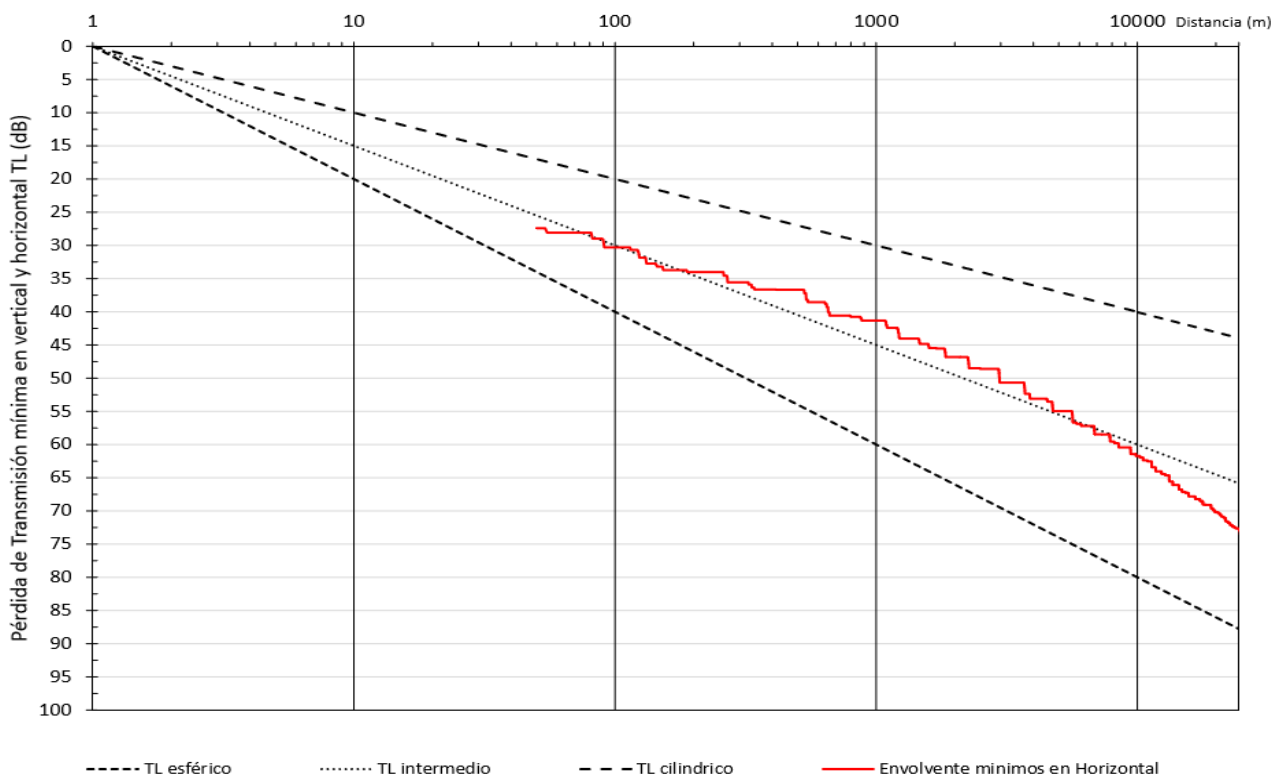


Figura 14. Ejemplo de resultado final del procesamiento de la matriz bidimensional de TL calculada por el modelo RAM para obtener la Pérdida de Transmisión mínima en vertical y en horizontal. Frecuencia 125 Hz. Profundidad variable Transecta 8 (BV8)



Los procesos matemáticos empleados para el cálculo son los siguientes:

$TL_V(x) = \text{mínimo } TL(z,x) \text{ entre } z = 0 \text{ (superficie) y } z = P(x) \text{ profundidad en el punto de distancia "x".}$

$TL_{V,H}(x) = \text{mínimo } TL_V(x) \text{ entre la distancia "x" y el límite de modelización (en este caso, 25.000 m).}$

La representación de $TL_{V,H}(x)$ resulta mucho más clara para realizar comparaciones y para definir distancias en los que se superen determinados valores de TL que los gráficos bidimensionales y las representaciones de $TL_V(x)$ que presentan oscilaciones.

Por lo tanto, en el presente Capítulo 6 y en el Anexo 2 de análisis de sensibilidad, todos los valores de TL que se ilustran en gráficos unidimensionales en función de la distancia como el mostrado en la Figura 14, que se mencionan como "Pérdida de Transmisión mínima" deben interpretarse como valores de $TL_{V,H}(x)$, obtenidos con los procedimientos presentados.

En cambio, en otros gráficos unidimensionales normalmente se denomina simplemente "Pérdida de Transmisión" al valor de $TL_V(x)$.

4.7 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Los análisis de sensibilidad de la Pérdida de Transmisión TL que se presentan en el Anexo 2, para 5 frecuencias representativas del espectro total (32, 63, 125, 250 y 500 Hz), permitieron alcanzar las siguientes conclusiones:

- **S1: Batimetría.** Sensibilidad a la variación de la batimetría en transectas perpendiculares a la costa, comparada con profundidades mínima y máxima en la zona de relevamiento. Hasta unos 2 km de distancia de la fuente la consideración de profundidad constante 30 metros es algo más conservativa en la mayor parte del tramo, luego las demás transectas son similares salvo la 1 que tiene mayor TL; la más conservativa en la mayor parte del tramo subsiguiente es la 8. Como conclusión se consideró conveniente mantener la condición de profundidad mínima uniforme para los análisis sucesivos, debido a que es algo más conservativa en un rango de hasta 1 km, incluyendo corridas de sensibilidad para la profundidad máxima, y dentro de las transectas de profundidad variable, continuar el análisis con la 6 y la 8.
- **S2: Mareas.** Sensibilidad a la pleamar y bajamar con batimetría uniforme máxima, mínima y variable. Se puede apreciar que no hay grandes diferencias en el análisis de sensibilidad a la profundidad (constante) entre las condiciones de Bajamar y Pleamar, siendo ligeramente más conservativa la Pleamar. En el caso de la profundidad máxima, resulta más conservativa a partir de los 2 km con lo cual no es relevante para el SPL, pero podría serlo para el cálculo del SELCUM. La conclusión del análisis de profundidad variable es que la transecta globalmente más conservativa es la 8 y se puede considerar la marea media como adecuadamente representativa de las condiciones de propagación del sonido, habiendo escasas diferencias en Pleamar y Bajamar.
- **S3: Tipo de suelo de la capa superior (arena y grava)** con batimetría uniforme máxima, mínima y variable. Este análisis mostró una gran variabilidad en cuanto a la relación entre TL para Arena y Grava a distintas distancias y para diferentes frecuencias, no resultando conclusivo.

- **S4: Tipo de suelo de la capa superior (arena y grava), y capa inferior (morenas)** con batimetría uniforme máxima, mínima y variable.
En las modelaciones con Grava, la presencia de la capa de Morena no afecta para frecuencias altas, mientras que para las frecuencias más bajas, según la profundidad de agua y la distancia a la fuente puede ser más o menos conservativo considerar la Morena.
Con respecto a las modelaciones con Arena, resulta en general algo más conservativo considerar la capa inferior de Morena. En este caso, resulta también más conservativo considerar Arena como capa superior, en vez de considerar Grava.
La conclusión obtenida es que si bien hay ligeras diferencias según la frecuencia y la distancia a la fuente, es conveniente considerar la capa superior como Arena y la inferior como Morena, condiciones adoptadas para las siguientes evaluaciones.
- **S5: Densidad y velocidad del sonido** estacional para las 4 estaciones y zonas de aguas someras y profundas, obtenidas de **Copernicus**.
La conclusión obtenida es que en casi todos los casos prácticamente no hay diferencias significativas en los resultados de TL entre WOD y Copernicus. En el único caso donde las hay (para profundidad máxima), la WOD es más conservativa en el tramo entre 30 m y 1.000 m desde la fuente. Aún en este caso, los perfiles de Copernicus para diferentes meses del año generan prácticamente el mismo resultado de TL, por lo que resulta irrelevante la selección de la época de relevamiento para la modelización.
- **S6: Espesor “z”** de las capas superiores de arena y de grava (incluyendo su influencia sobre C_s) y de la capa subyacente de Morena, con batimetría uniforme máxima, mínima y variable.
Como conclusión, para los cálculos subsiguientes se mantuvo el espesor de 5 metros de la capa superior considerada como Arena y de 25 metros para la capa inferior de Morena.
- **S7: Sensibilidad a los parámetros del suelo C_p , α_p , α_s y densidad** para las capas superior e inferior, batimetría uniforme máxima, mínima y variable.
Se concluyó que en general las diferencias obtenidas para los distintos parámetros de la Arena son poco significativas y que la condición Base empleando los parámetros propuestos por Jensen et al. (2011) es adecuadamente conservativa para las diferentes profundidades ensayadas.
En el caso de la Morena, se consideró adecuado incrementar el valor de la velocidad compresional de 1.950 m/s a 2.000 m/s, siendo esta condición más conservativa dentro de un rango de variabilidad razonable de este parámetro.
- **S8: Densidad y velocidad del sonido** estacional para las 4 estaciones y zonas de aguas someras y profundas, obtenidas de **la World Ocean Database**.
Las TL obtenidas para profundidad mínima uniforme y profundidad variable son menores que para profundidad máxima uniforme en distancias cortas, mientras que sucede al revés en distancias largas, al menos para la frecuencia de 63 Hz.
La condición de profundidad variable resulta ligeramente menos conservativa que la de profundidad mínima uniforme para distancias cortas (1 a 2 km) y más conservativa para distancias largas.

Como resultado de este análisis, se decidió seleccionar los perfiles representativos de Primavera de la WOD (somero y profundo según corresponda). Dado que cada condición de profundidad analizada presenta tramos en los que es más conservativa que las otras, y tramos donde es menos conservativa, se concluyó que resulta conveniente calcular sistemáticamente la TL para todos los tercios de Octavas, considerando cada una de las tres condiciones de profundidad ensayadas, ya que no resulta factible a priori, seleccionar con seguridad una de ellas como la más conservativa, especialmente para el cálculo de la acumulación del SEL (SELcum).



Los parámetros que se deben especificar para la modelización son ρ o ρ_b : densidad del sedimento, C_p : Velocidad compresional del sonido en el sedimento, C_s =Velocidad de corte, α_p (o A_p): atenuación asociada a la onda compresional, α_s (o A_s): atenuación asociada a la onda de corte.

Los parámetros finalmente adoptados para las modelizaciones sistemáticas desde la frecuencia de corte hasta 1 kHz son los siguientes.

Tabla 4. Parámetros del modelo RAM empleados

Parámetro	Arena (capa superior)	Morena (capa inferior)
Espesor capa z (m)	5	25
C_p (m/s)	1.650	2.000
ρ (kg/m ³)	1.900	2.100
C_s (m/s)	178	600
A_p (dB/ λ_p)	0,8	0,4
A_s (dB/ λ_s)	2,5	1,0

5 RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN MATEMÁTICA SISTEMÁTICA DE LA PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN

Una vez seleccionadas las condiciones y parámetros de cálculo de la Pérdida de Transmisión en base a los análisis de sensibilidad efectuados, el proceso de modelación se realizó en forma sistemática para todas las frecuencias en tercios de octavas hasta 1 kHz según la definición brindada en la fórmula [7] del parágrafo 2.9.2.2 “Características de la emisión por parte de arreglos de prospección sísmica” del Capítulo 4, y los valores espectrales presentados en el parágrafo 2.9.3 “Emisión sonora submarina por las fuentes de energía de aire comprimido” del mismo Capítulo.

Las modelaciones sistemáticas de la Pérdida por Transmisión TL se han efectuado para diferentes profundidades iniciando en cada caso la serie de tercios de octava en la frecuencia de corte f_0 que resulta de la aplicación de la fórmula de cálculo siguiente:

$$f_0 = C_w / (4 H (1 - (C_w/C_b)^2)^{0,5}). \text{ Computational Ocean Acoustics (2d Ed., Jensen et al.)} \quad [8]$$

Donde H es la profundidad de agua.

Considerando las velocidades del sonido C_b en arena y grava y una velocidad típica en el agua, y teniendo en cuenta que en la transecta 8 las profundidades son superiores a 45 metros hasta 22 km de la fuente, se estimaron las siguientes frecuencias de corte:

C_w (m/s) =	1480		
H (m) =	30	45	130
arenas f_0 =	27,9	18,6	6,4
gravas f_0 =	21,7	14,4	5,0

Las frecuencias modeladas abarcan desde la mínima (rango que incluye la frecuencia de corte) y 1.000 Hz, resultando las siguientes:



Profundidad	Frecuencia mínima	Cantidad de frecuencias
Mínima 30 m (B0)	25 Hz	17
Máxima 130 m (BA)	6,3 Hz	23
Variable 45 m (BV8)	20 Hz	18

Los resultados obtenidos de $TL_{V,H}(x)$ y $TL_V(x)$ para las condiciones seleccionadas se presentan a continuación en la Figura 15 a la Figura 17.

En el caso de la pérdida de transmisión mínima los resultados correspondientes a distancias inferiores a 10 metros, dado que para frecuencias bajas los valores que calcula el modelo RAM no resultaron confiables para distancias menores (cuestión que de todas formas es irrelevante para el presente análisis).

Se puede apreciar que los resultados se encuentran en general en el entorno de una propagación teórica intermedia. Los valores de TL para profundidad variable y para profundidad máxima, son globalmente similares entre si. En cambio, las condiciones de profundidad mínima presentan valores de TL menores que las otras dos hasta una distancia del orden de 1 km, mientras que son mayores para distancias mayores.

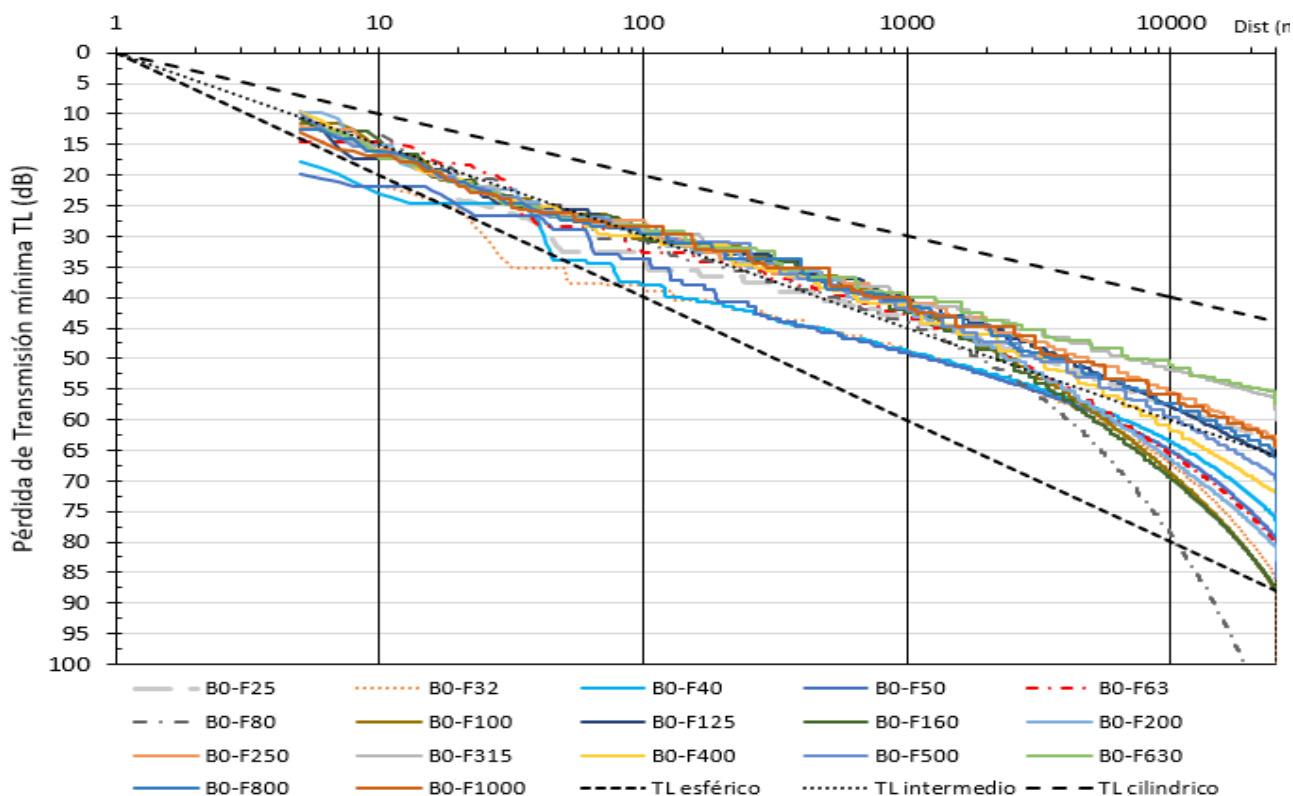


Figura 15. Pérdida de Transmisión mínima en la vertical TL_V para la condición más conservativa del análisis de sensibilidad Profundidad constante mínima – 25 Hz a 1.000 Hz



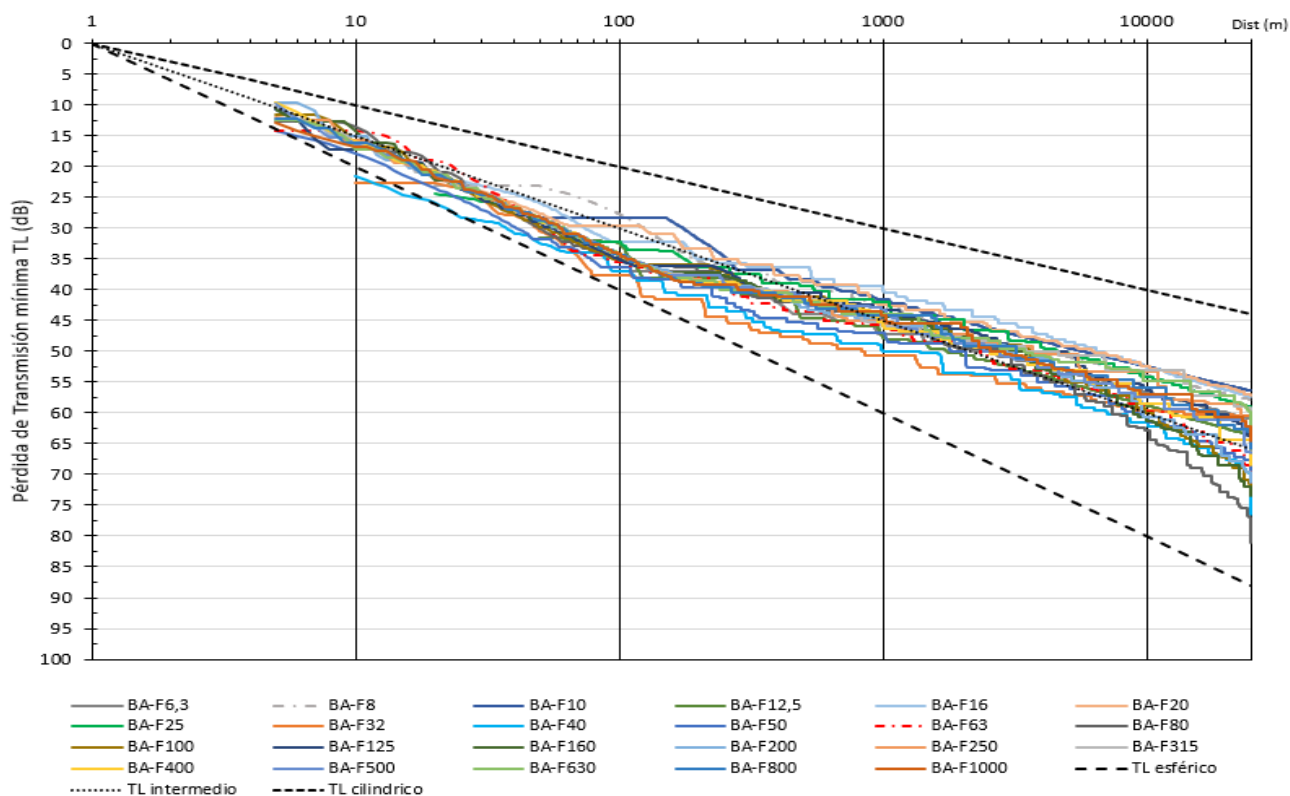


Figura 16. Pérdida de Transmisión mínima en la vertical TL_v para la condición más conservativa del análisis de sensibilidad Profundidad constante máxima - 6,3 Hz a 1.000 Hz

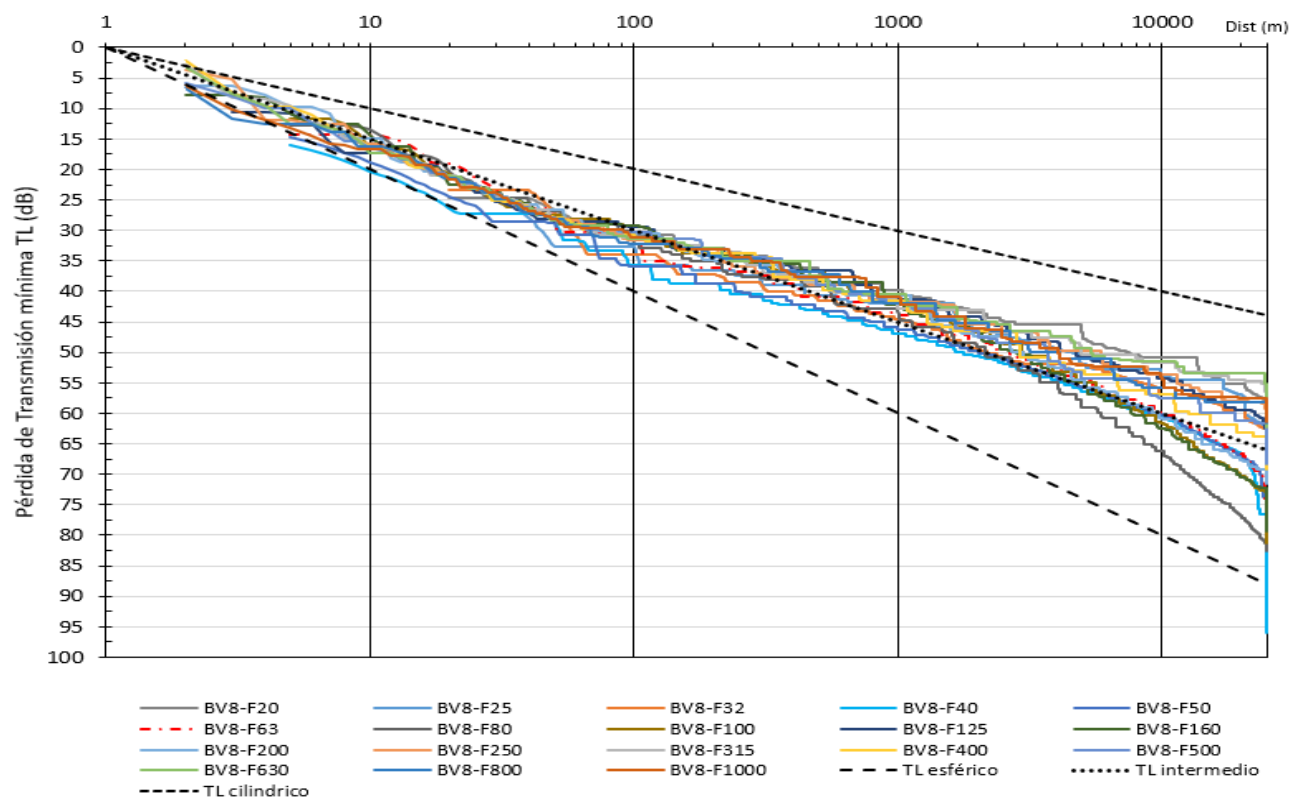


Figura 17. Pérdida de Transmisión mínima en la vertical TL_v para la condición más conservativa del análisis de sensibilidad Profundidad Variable Transecta 8- 20 Hz a 1.000 Hz



6 RESULTADOS DE LA PROPAGACIÓN DEL SEL

Como se indicó en el Capítulo 4, los niveles sonoros emitidos verticalmente son como mínimo entre 15 y 24 dB mayores que aquellos dirigidos horizontalmente (Caldwell y Dragoset, 2000). La propagación del sonido a grandes distancias requiere la modelización de la emisión horizontal, que presenta en su conjunto menor energía que la vertical.

En el presente estudio, en vez de adoptar una diferencia constante entre la emisión horizontal y vertical seleccionada en el rango indicado previamente, se realiza la modelización de todo el rango de tercios de octavas seleccionando el espectro correspondiente a un dado ángulo respecto de la vertical (Dip) para un ángulo respecto a la dirección de avance (Azimut).

Como se mostró en el Capítulo 4, la emisión horizontal del arreglo (Dip 90°) posee una energía muy inferior a la que se obtiene para ángulos incluso ligeramente menores.

En la Tabla 5 se presenta la distancia recorrida por el sonido hasta llegar al lecho, para distintas condiciones de profundidad y ángulo de emisión. A partir de estas distancias, se va atenuando el sonido por interacción con el lecho marino donde es en parte absorbido y en parte reflejado. En las zonas de profundidad uniforme mínima (B0) y variable (BV8), la distancia recorrida hasta llegar al lecho por el “rayo” de emisión sonora con un ángulo Dip de 85° (5° respecto a la horizontal) es relativamente baja (menor a 500 metros). En cambio, en la zona de profundidad máxima (BA), teniendo en cuenta que la distancia alcanzada para 85° es del orden de 1,5 km, se adoptó un ángulo de 80° como referencia de la emisión, cuya distancia para alcanzar el lecho es menor a 750 metros. Como se muestra más adelante, estas distancias son menores que las distancias de exclusión requeridas para alcanzar los umbrales de SPL y de SELcum que producen PTS, por lo que se adoptan estos ángulos como referencia.

Tabla 5 Distancia recorrida por el rayo según la profundidad y ángulo $D = h * \tan(\text{Dip})$

Ángulo respecto a la vertical (Dip)	Profundidad h (m)	Distancia recorrida (m)	Profundidad h (m)	Distancia recorrida (m)
70° (20° horiz.)	30	82	130	357
80° (10° horiz.)	30	170	130	737
85° (5° horiz.)	30	343	130	1486

La Tabla 8 “SEL (dB re 1 μPa^2 s a 1 m) total emitido para diferentes ángulos respecto a la vertical y Azimut respecto a la dirección de avance” del Capítulo 4, muestra que en la dirección de avance (Azimut 0°), el SEL para Dip 85° es aproximadamente menor que para Dip 0° (vertical) en 21 dB. Pero, además, se puede apreciar que para la emisión en dirección perpendicular al avance (Azimut 90°), la diferencia entre el SEL para Dip 85° y 0° se reduce a 14 dB. En cambio, para Azimut 45° se incrementa ligeramente a 22,7 dB. El SEL para Dip 80° con Azimut 0° y 45° es menor que para Dip 0° (vertical) en unos 17 dB, mientras que para la emisión en dirección perpendicular al avance (Azimut 90°), la diferencia se reduce a 9 dB, siendo esta situación mucho más conservativa que los criterios considerados en la bibliografía aplicable.

En consecuencia, se analizó la propagación del SEL para el espectro de tercios de octavas comparando las siguientes condiciones:



- Emisión vertical (Dip 0°) a modo de referencia.
- Azimut 0° y Dip 85° (profundidad mínima uniforme y variable)
- Azimut 45° y Dip 85° (profundidad mínima uniforme y variable)
- Azimut 90° y Dip 85° (profundidad mínima uniforme y variable)
- Azimut 0° y Dip 80° (profundidad máxima)
- Azimut 45° y Dip 80° (profundidad máxima)
- Azimut 90° y Dip 80° (profundidad máxima)

Asimismo, se evaluó el efecto de filtrado con el audiograma de cada grupo auditivo, información necesaria para el posterior cálculo del SEL acumulado.

El procedimiento se realizó para cada una de las bandas desde la frecuencia de corte calculada con la ecuación [8] hasta 1 kHz.

A partir del Source Level $SL_B(j)$ para cada banda "j" y restando la Pérdida de Transmisión Mínima $TL_{V,H}(R,j)$ para cada distancia "R" de la fuente y banda, se calculó el nivel de SEL recibido $RL_B(R,j)$ en cada distancia y banda empleando la ecuación [5].

Los valores obtenidos de SEL recibido $RL_B(R,j)$ para cada banda, sin filtro y para cada filtro auditivo se presentan en el Anexo III para cada caso. A título ilustrativo se incluyen aquí los resultados para las condiciones sin filtro en la Figura 18 a la Figura 26.

Se destacó en punteado una frecuencia característica de la parte de mayor emisión del espectro (80 Hz) solo a los efectos de permitir una visualización y comparación de su grado de reducción al aplicar los diferentes filtros.

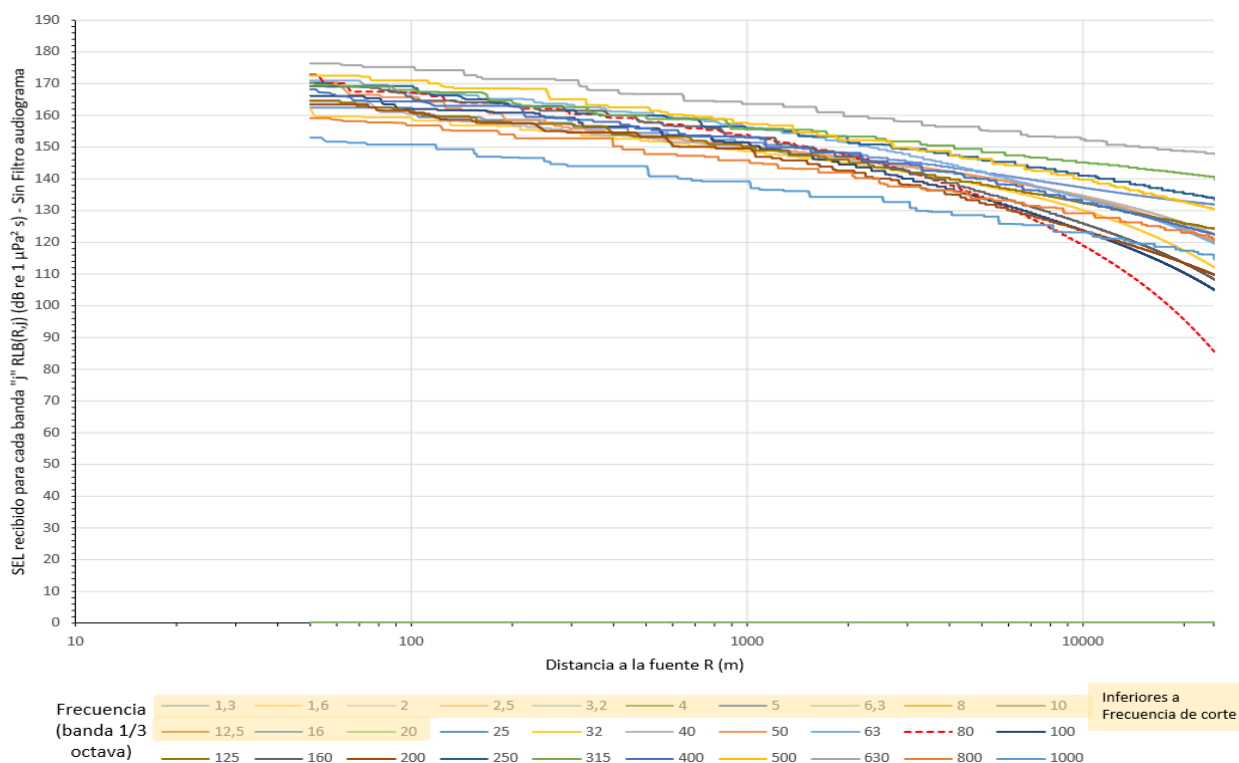


Figura 18. SEL recibido (RL) para cada banda. Profundidad mínima Uniforme (B0). Azimut 0° Dip 85°. Sin Filtro



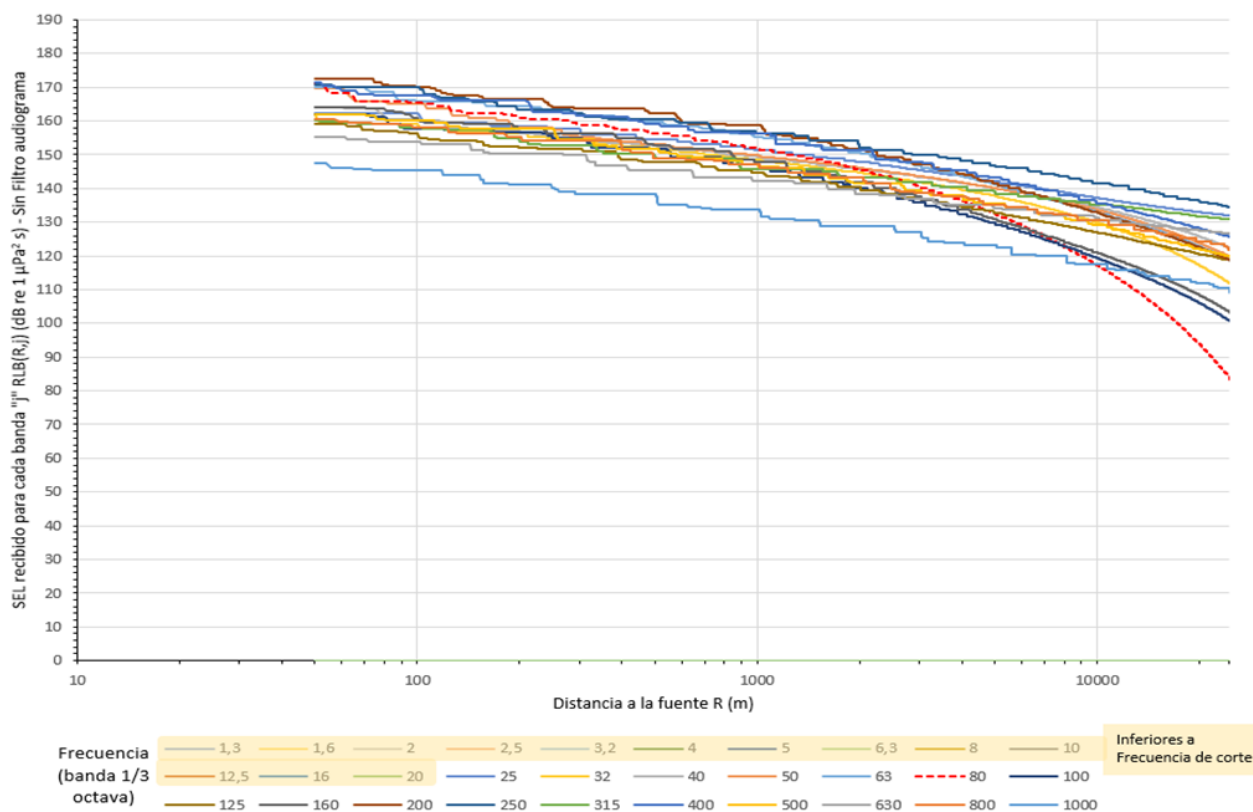


Figura 19. SEL recibido (RL) para cada banda. Profundidad mínima Uniforme (B0). Azimut 45° Dip 85°. Sin Filtro

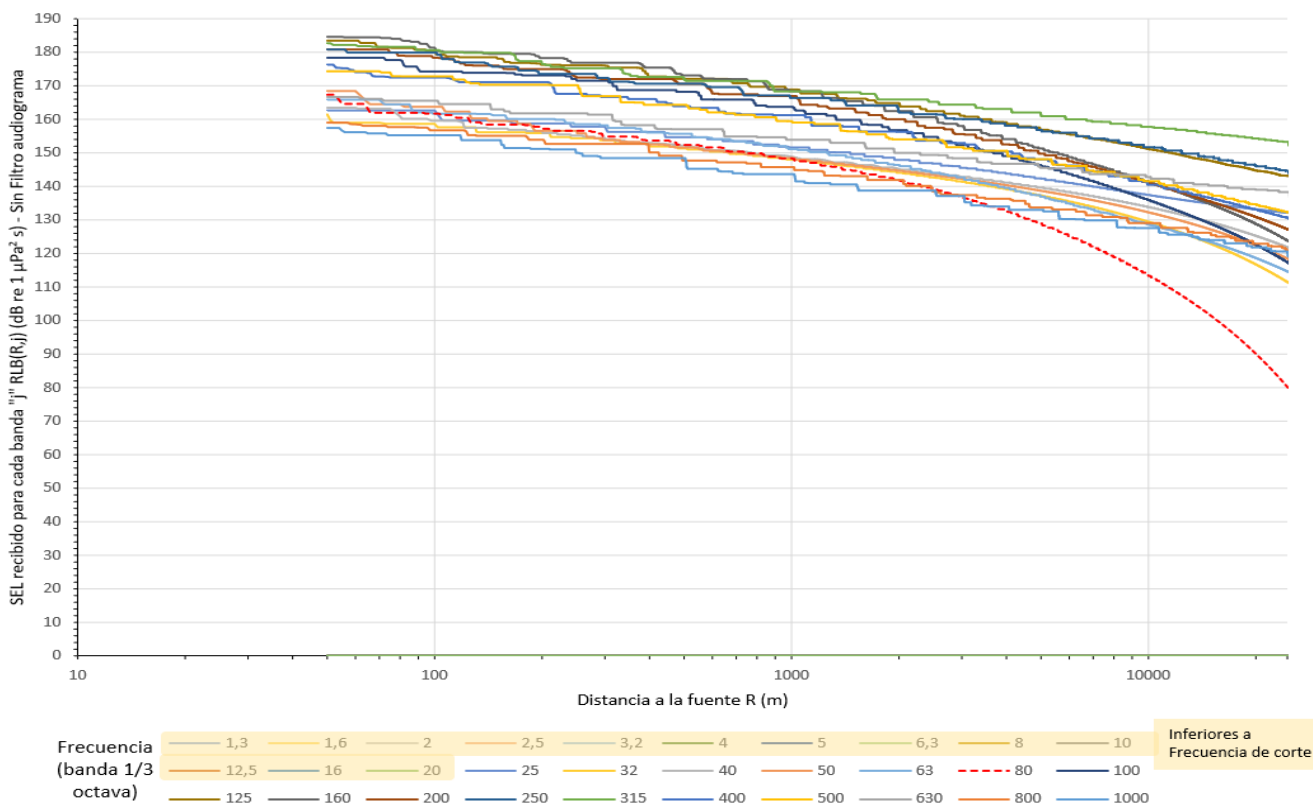


Figura 20. SEL recibido (RL) para cada banda. Profundidad mínima Uniforme (B0). Azimut 90° Dip 85°. Sin Filtro



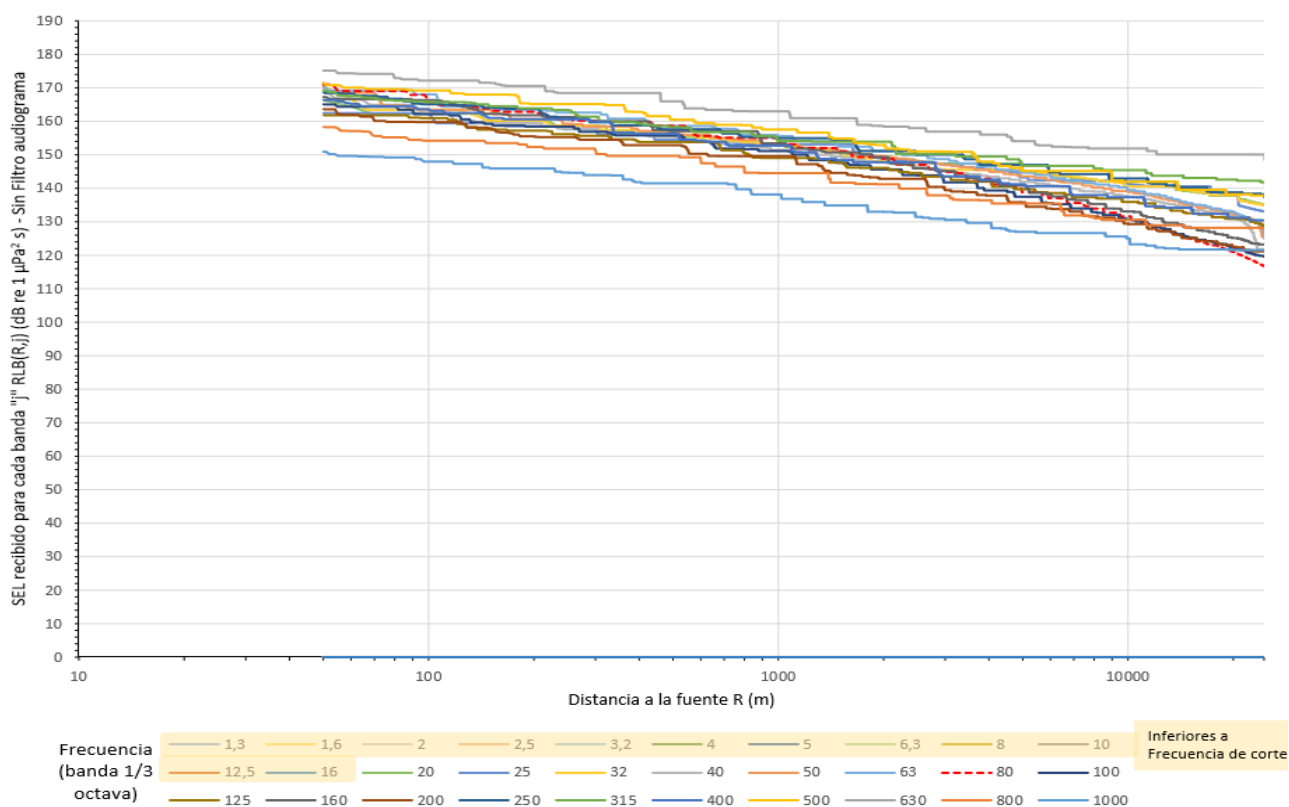


Figura 21. SEL recibido (RL) para cada banda. Profundidad Variable (BV8). Azimut 0° Dip 85°. Sin Filtro

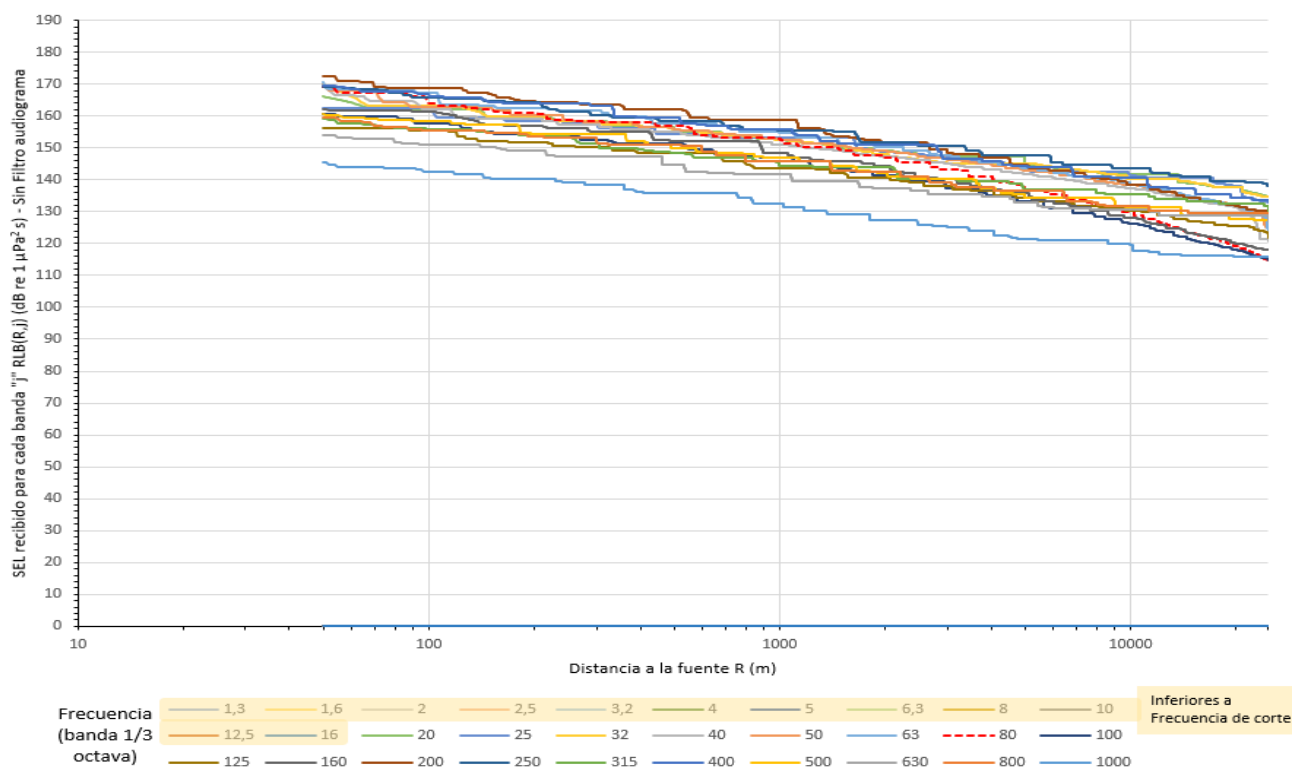
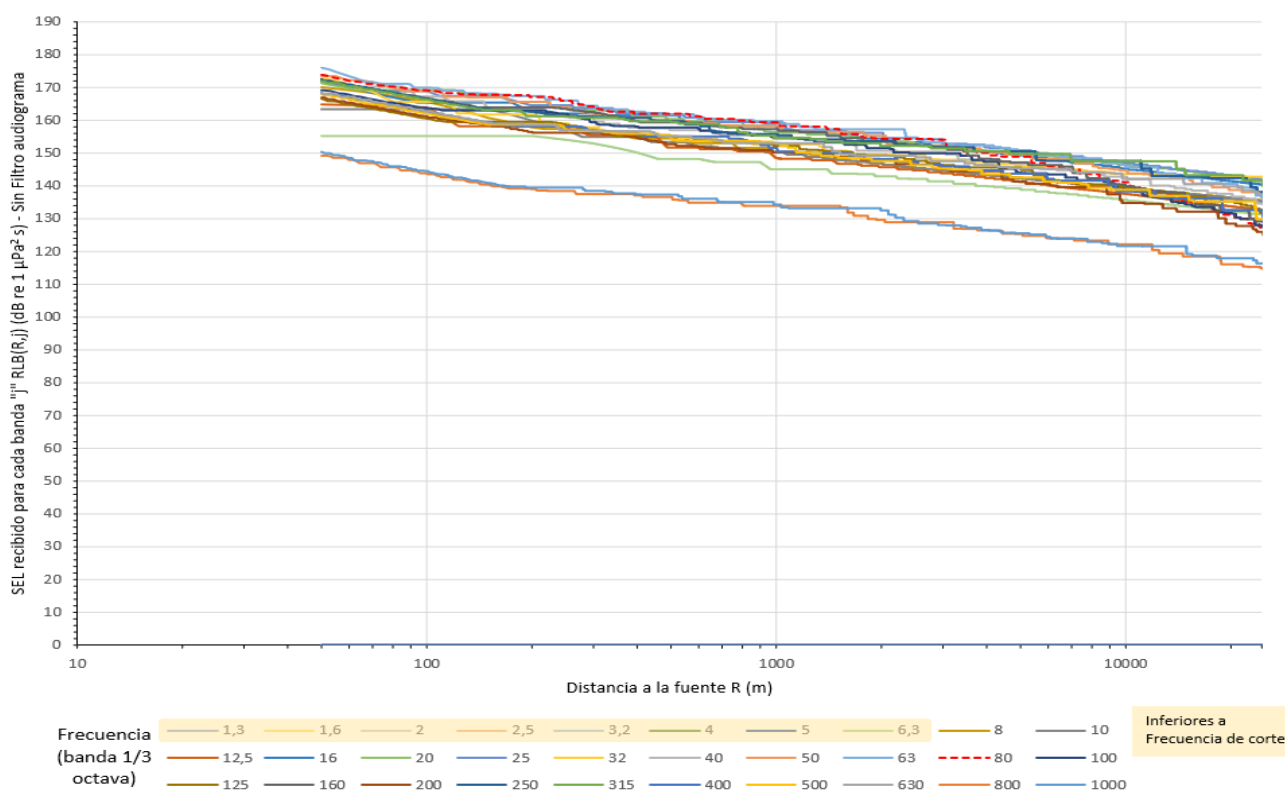
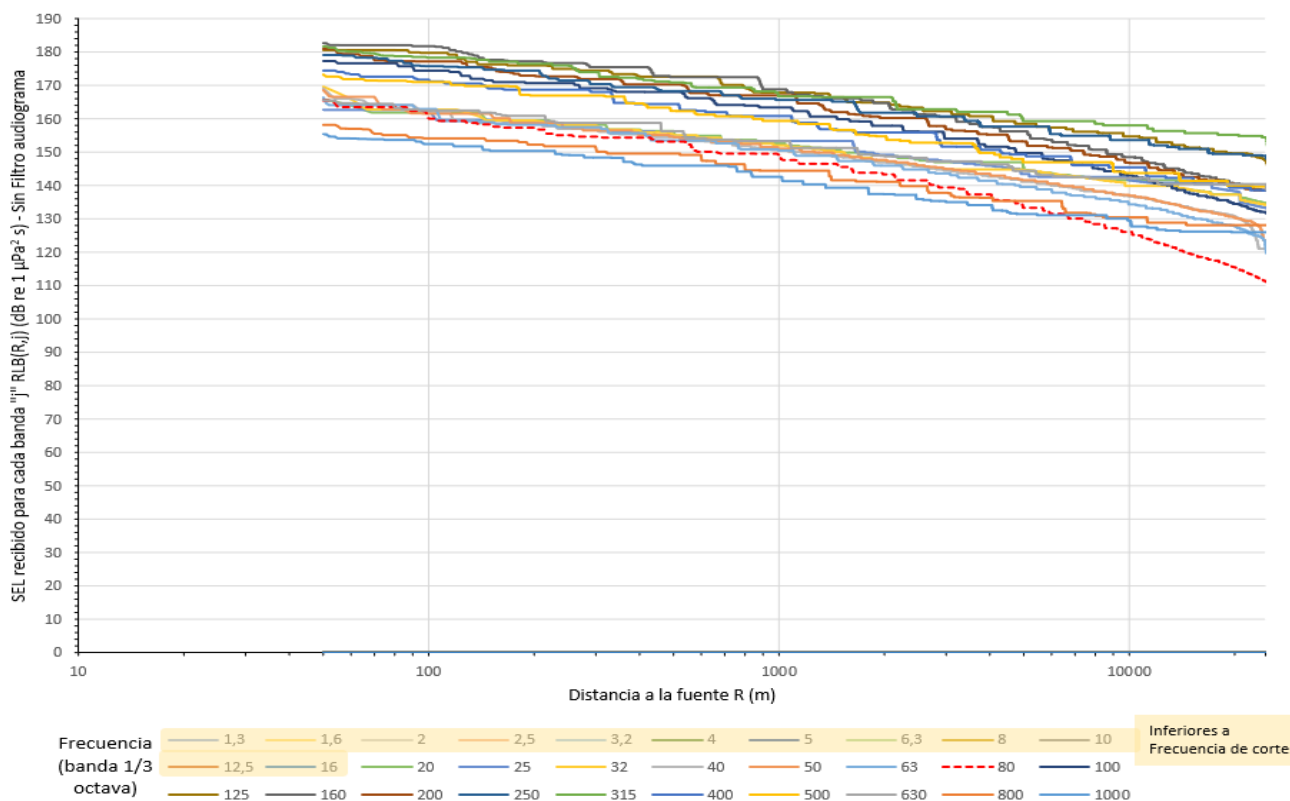


Figura 22. SEL recibido (RL) para cada banda. Profundidad Variable (BV8). Azimut 45° Dip 85°. Sin Filtro





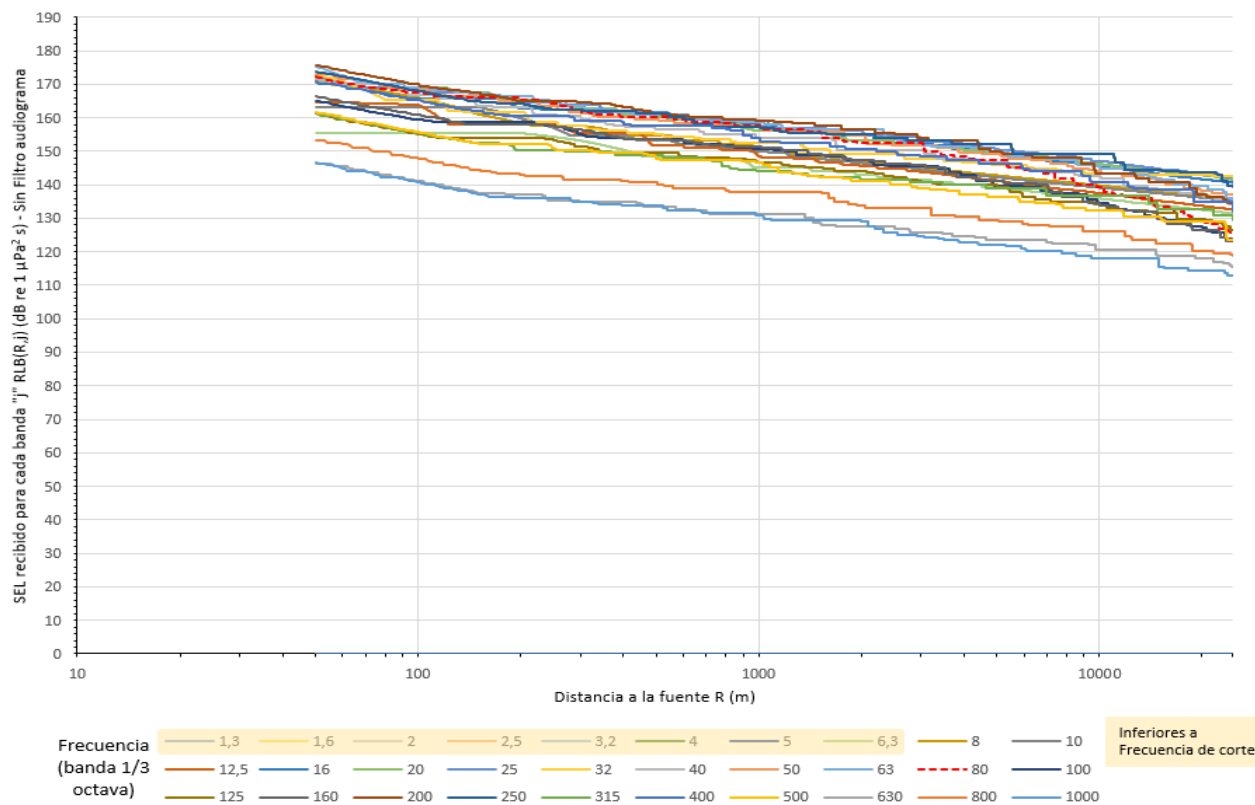



Figura 25. SEL recibido (RL) para cada banda. Profundidad máxima Uniforme (BA). Azimut 45° Dip 80°. Sin Filtro

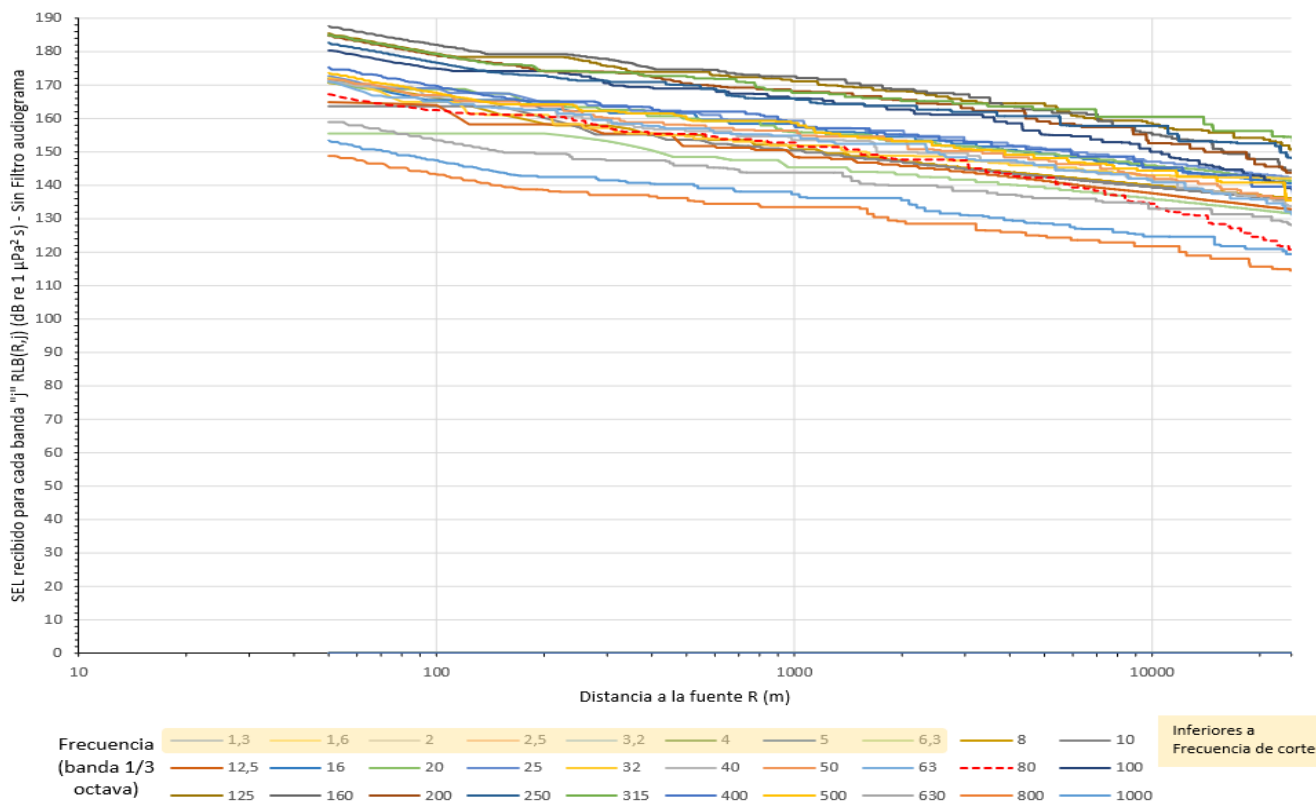


Figura 26. SEL recibido (RL) para cada banda. Profundidad máxima Uniforme (BA). Azimut 90° Dip 80°. Sin Filtro



Al observar los gráficos precedentes, cabe recordar que los “escalones” y tramos con SEL constante que se visualizan para algunas frecuencias (especialmente las más bajas), se deben a que una oscilación en un punto “d” que disminuya el valor de $TL_{V,H}(d)$ en relación con los valores para distancias menores ($x < d$), implica que el valor de $TL_V(d)$ (mínimo) será igual a $TL_{V,H}(d)$ en un cierto tramo con $x < d$ (hasta que se produzca la siguiente oscilación con menor valor de $TL_{V,H}$), con lo cual el valor del SEL calculado se mantiene estable sin modificaciones en el mismo tramo (criterio conservativo).

Las contribuciones al SEL por parte de cada banda se suman en el dominio lineal y se vuelven a representar en el dominio logarítmico en decibeles, mediante la siguiente ecuación:

$$RL(SEL_{TOTAL}) = \log_{10} \left[\sum_{j=1}^N 10^{\frac{RL_B(j)}{10}} \right] \quad [9]$$

Donde:

N = número de bandas de 1/3 de octava.

Los resultados de $RL(SEL_{TOTAL})$ se presentan en las siguientes figuras, que incluyen el SEL total recibido para Dip 0° (el cual es independiente del Azimut) y en los casos de profundidad mínima uniforme y profundidad variable con el ángulo Dip 85° para Azimut 0° o para Azimut 90°, junto con la diferencia con el valor para Dip 0°. Para profundidad máxima se considera Dip 80°.

Esta diferencia es la que en realidad influye en la acumulación del SEL para cada distancia cuando se adopta un ángulo de emisión diferente del vertical.

Los resultados para el caso de profundidad B0 se presentan en la Tabla 6 y la Tabla 8, para el caso BV8 se presentan en la Tabla 9 y la Tabla 11, y para el caso BA que se presentan en la Tabla 12 y la Tabla 14.

Tal como se indicó en el Capítulo 4 se considera en general que los niveles sonoros emitidos verticalmente son como mínimo entre 15 y 24 dB mayores que aquellos dirigidos horizontalmente (Caldwell y Dragoset, 2000). Se puede apreciar en las tablas anteriores que según las condiciones de profundidad consideradas las diferencias medias en el caso sin filtro para Azimut 0° las diferencias entre la emisión vertical en un ángulo cercano al horizontal varían entre unos 14 y 17 dB, con máximos puntuales entre 17 y 21 dB. Para Azimut 90° en cambio, cuyas emisiones en general son mayores que para Azimut 0°, las diferencias medias varían entre unos 7 y 11 dB, con máximos puntuales entre 9 y 14 dB.

Considerando que el valor de SPL sin Filtro para Azimut 90° es el que finalmente será condicionante de las distancias de seguridad con respecto a la superación de los umbrales de PTS y TTS con esta métrica, estas condiciones implican que se está considerando una emisión horizontal conservativa y acorde a los valores citados en la bibliografía.

Las diferencias entre la emisión vertical y horizontal para los valores de SEL transmitido filtrado por audiogramas, son aún menores que para la condición sin filtro, variando en general entre valores medios de 11 a 15 dB para Azimut 0° y entre 3 y 7 dB para Azimut 90°, considerando el filtro LF, y valores menores para los demás audiogramas. Se considera por lo tanto, que estas condiciones son también adecuadamente conservativas para la evaluación de la acumulación del SEL, que es la otra métrica a ser considerada para la definición de las distancias de seguridad.



En el Anexo III se presentan los resultados para todos los casos analizados. A título ilustrativo, en la Figura 27 y la Figura 28 se presentan los resultados obtenidos en la condición sin filtro para B0, en la Figura 30 y la Figura 32 se presentan para BV8, y en la Figura 33 y la Figura 35 se presentan para BA.

Tabla 6. Profundidad mínima Uniforme (B0). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 0° entre Dip 0° y Dip 85°

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Mínima	11,8	9,6	3,5	2,9	6,0	3,4
Media	14,3	11,4	4,7	4,1	7,5	4,6
Máxima	21,1	17,3	8,2	7,4	12,1	7,8
Desvío Estándar	2,1	1,5	0,8	0,8	1,1	0,7

Tabla 7. Profundidad mínima Uniforme (B0). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 45° entre Dip 0° y Dip 85°

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Mínima	21,3	19,8	15,8	15,2	18,2	15,6
Media	22,0	21,4	19,2	18,7	20,6	19,3
Máxima	23,4	23,0	21,1	20,6	22,4	21,2
Desvío Estándar	0,4	0,9	1,2	1,2	1,1	1,3

Tabla 8. Profundidad mínima Uniforme (B0). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 90° entre Dip 0° y Dip 85°

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Mínima	8,0	6,6	4,4	4,1	5,5	4,3
Media	9,2	7,1	5,0	4,7	6,1	4,9
Máxima	13,3	10,0	6,5	6,2	8,2	6,2
Desvío Estándar	1,2	0,7	0,4	0,4	0,5	0,3

Tabla 9. Profundidad Variable (BV8). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 0° entre Dip 0° y Dip 85°

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Mínima	13,4	10,0	4,0	3,6	6,3	3,9
Media	17,1	12,6	5,4	4,8	8,3	5,2
Máxima	21,4	17,7	8,4	7,6	12,4	7,9
Desvío Estándar	1,8	1,7	0,9	0,9	1,3	0,9



Tabla 10. Profundidad Variable (BV8). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 45° entre Dip 0° y Dip 85°

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Mínima	21,0	19,5	15,8	15,2	17,9	15,6
Media	21,9	20,4	17,8	17,4	19,3	17,9
Máxima	23,5	21,5	18,6	18,2	19,9	18,7
Desvío Estándar	0,4	0,3	0,6	0,7	0,5	0,7

Tabla 11. Profundidad Variable (BV8). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 90° entre Dip 0° y Dip 85°

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Mínima	8,3	6,0	6,6	6,8	6,2	6,6
Media	10,6	6,8	6,9	7,1	6,6	6,8
Máxima	13,9	10,0	7,8	7,8	8,6	7,5
Desvío Estándar	1,0	0,8	0,2	0,2	0,5	0,2

Tabla 12. Profundidad máxima Uniforme (BA). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 0° entre Dip 0° y Dip 80°

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Mínima	15,4	13,4	10,1	9,7	11,8	9,9
Media	16,1	14,7	11,0	10,6	12,8	10,7
Máxima	17,2	16,8	12,4	12,0	14,7	12,0
Desvío Estándar	0,5	1,0	0,6	0,5	0,8	0,5

Tabla 13. Profundidad máxima Uniforme (BA). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 45° entre Dip 0° y Dip 80°

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Mínima	16,1	15,3	15,2	15,2	15,5	14,9
Media	16,7	16,4	16,5	16,7	16,3	16,5
Máxima	17,9	17,6	18,1	18,2	17,9	18,2
Desvío Estándar	0,4	0,6	0,7	0,7	0,6	0,8

Tabla 14. Profundidad máxima Uniforme (BA). Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 25 km para Azimut 90° entre Dip 0° y Dip 80°

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Mínima	6,8	2,5	3,6	4,0	2,7	3,5
Media	7,6	3,3	4,1	4,5	3,3	4,0
Máxima	9,3	5,2	5,1	5,7	4,6	5,1
Desvío Estándar	0,4	0,6	0,3	0,3	0,4	0,3



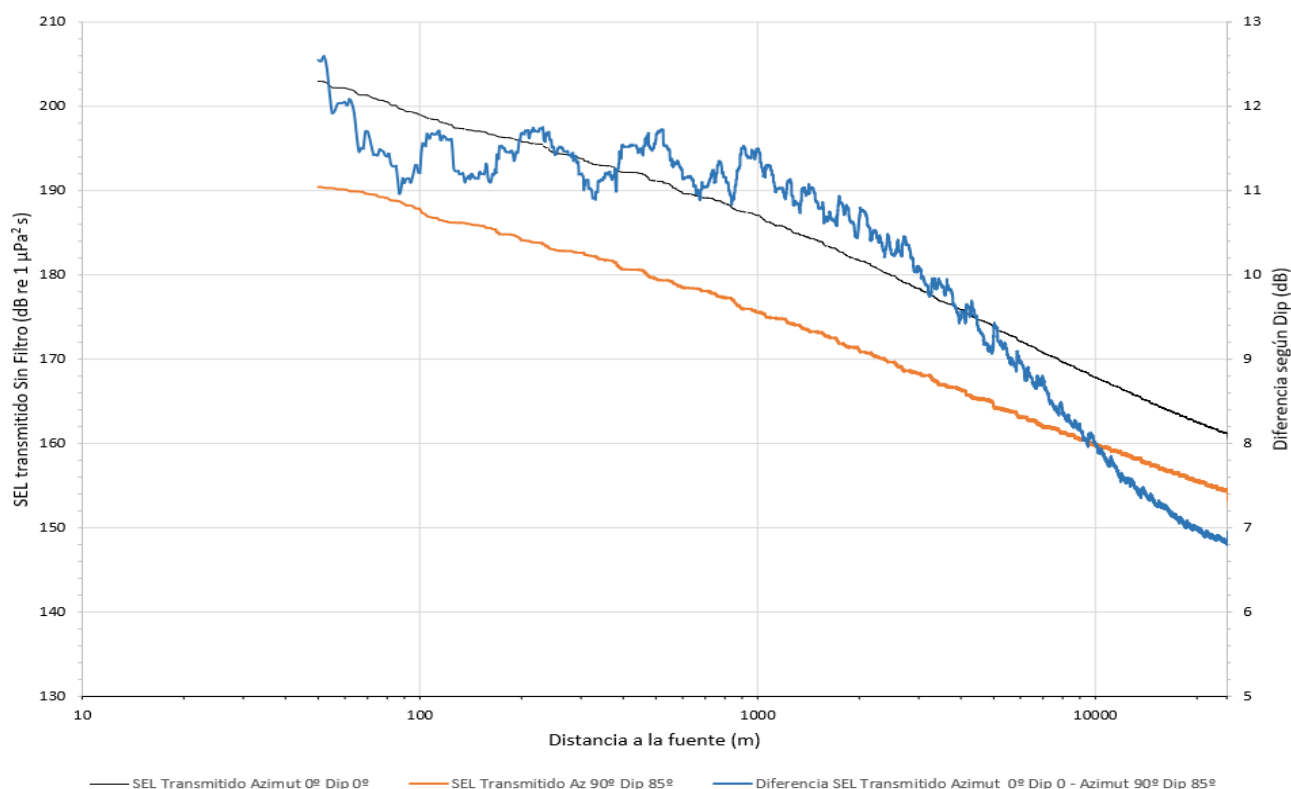


Figura 27. SEL recibido (RL). Profundidad mínima Uniforme (B0). Dip 0° - Azimut 90° Dip 85° Sin Filtro

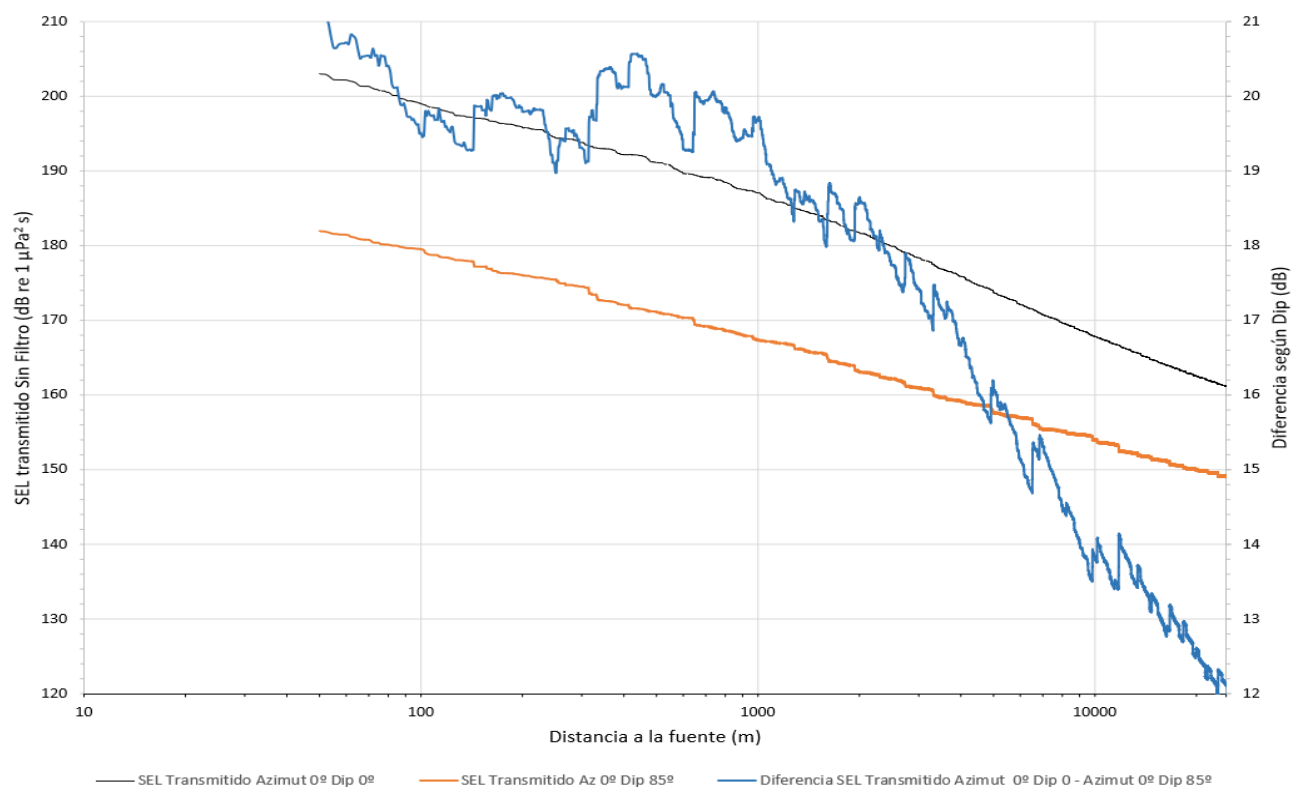


Figura 28. SEL recibido (RL). Profundidad mínima Uniforme (B0). Azimut 0° Dip 0°-85° Sin Filtro



Ing. MARIANO MICULICH
Director
SERMAN & ASOCIADOS S.A.



Figura 29. SEL recibido (RL). Profundidad mínima Uniforme (B0). Azimut 45° Dip 0°-85° Sin Filtro

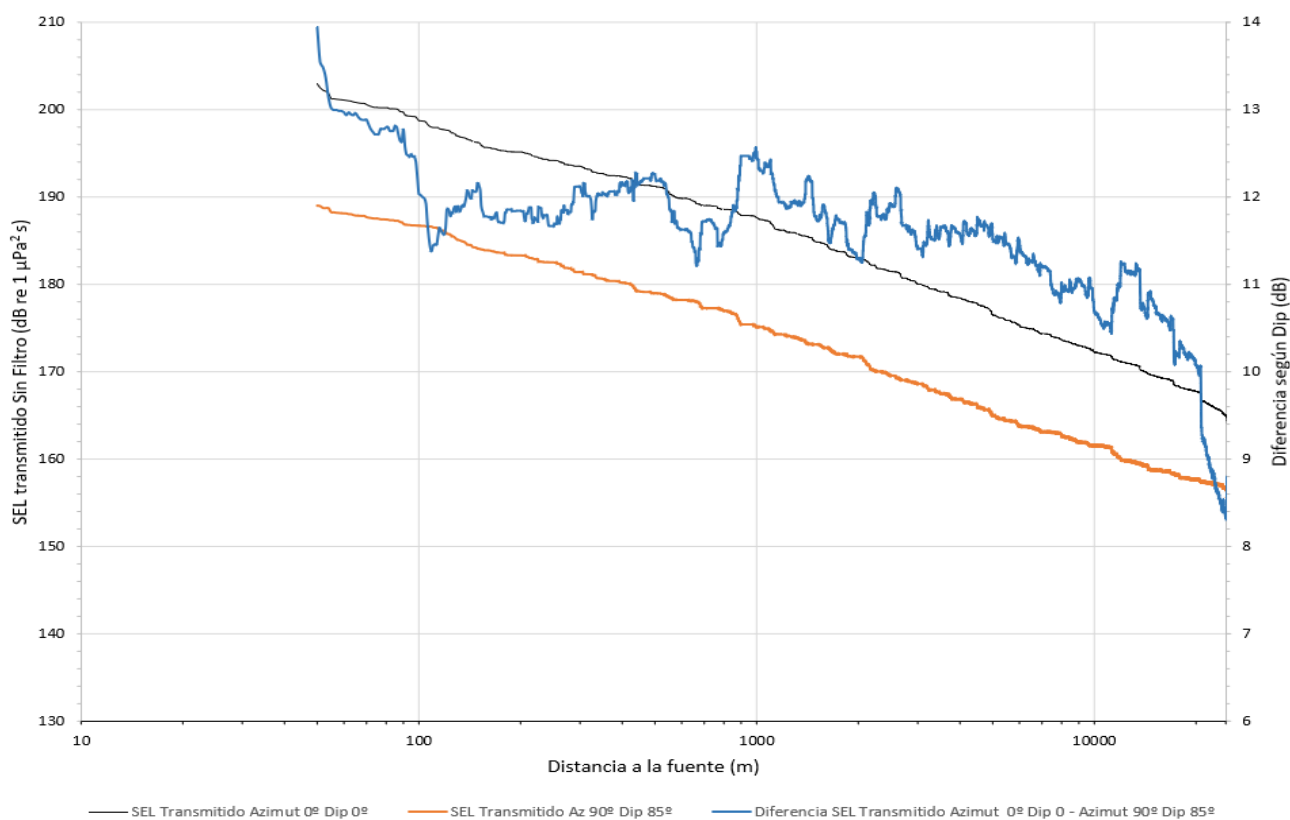


Figura 30. SEL recibido (RL). Profundidad Variable (BV8). Dip 0° - Azimut 90° Dip 85° Sin Filtro





Figura 31. SEL recibido (RL). Profundidad Variable (BV8). Dip 0° - Azimut 45° Dip 85° Sin Filtro



Figura 32. SEL recibido (RL). Profundidad Variable (BV8). Azimut 0° Dip 0°-85° Sin Filtro



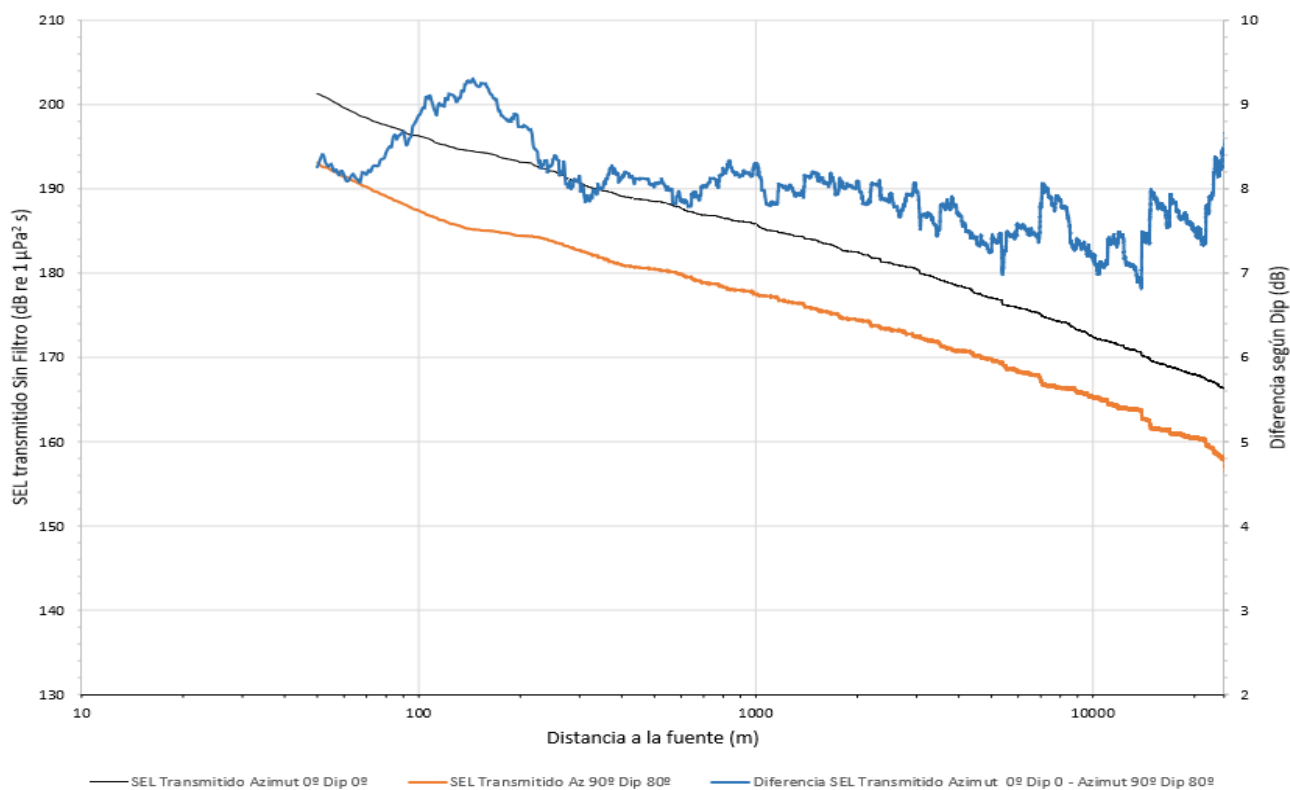


Figura 33. SEL recibido (RL). Profundidad máxima Uniforme (BA). Dip 0° - Azimut 90° Dip 80° Sin Filtro

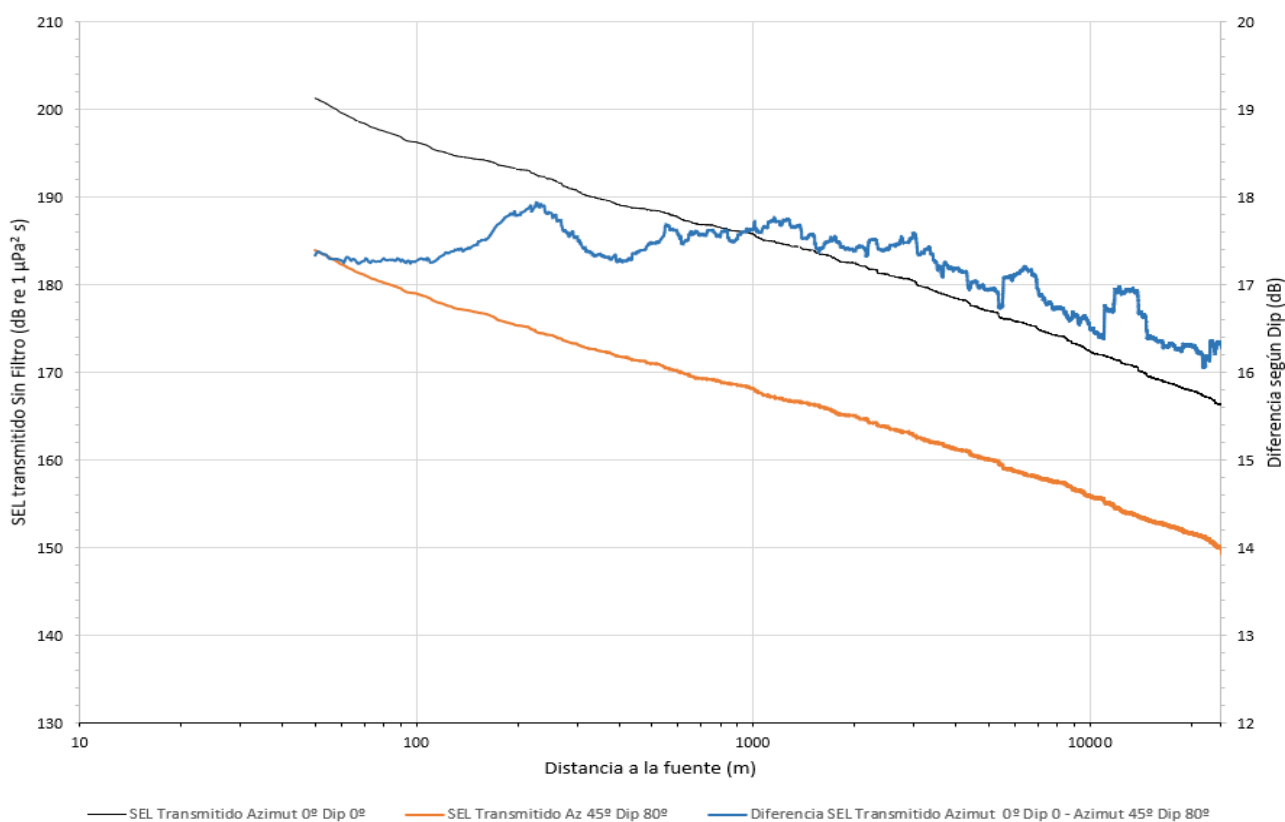


Figura 34. SEL recibido (RL). Profundidad máxima Uniforme (BA). Dip 0° - Azimut 45° Dip 80° Sin Filtro



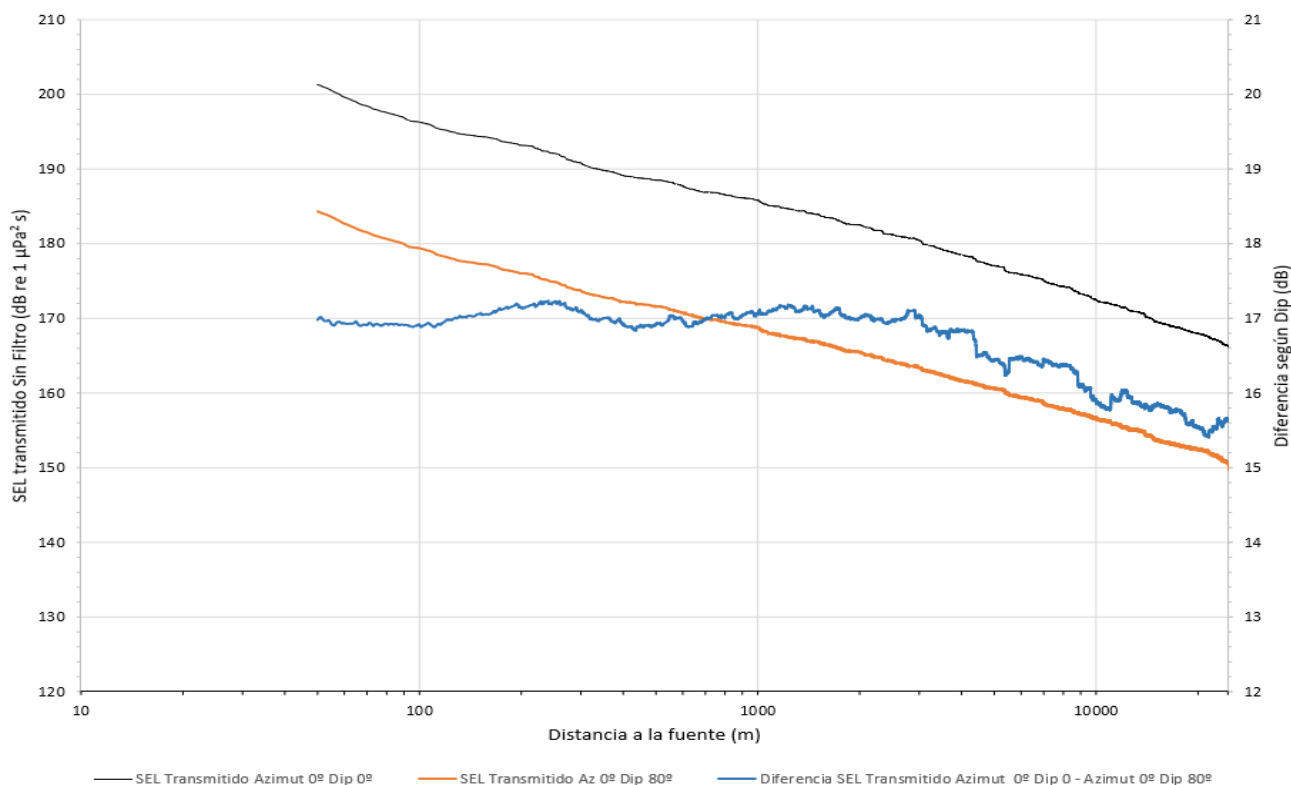


Figura 35. SEL recibido (RL). Profundidad máxima Uniforme (BA). Azimut 0° Dip 0°-80° Sin Filtro

7 EVALUACIÓN DE DISTANCIAS PARA ALCANZAR LOS UMBRALES DE SPL

A partir de los resultados de la propagación del SEL previamente presentados (valores de SEL recibido RL sin filtro), se estimaron los valores recibidos del SPL_{peak} en función de la distancia a la fuente de emisión, incrementando conservativamente en 24 dB el valor del SEL, procedimiento que se justifica en el punto 0 del presente Capítulo y en el acápite 2.9.3 del Capítulo 4.

A los efectos prácticos y ante las irregularidades que presentan las soluciones del RAM para distancias cortas y frecuencias bajas, se realizó el análisis considerando una distancia mínima de 50 metros desde el “centro” virtual del arreglo emisor.

Los cálculos de distancias fueron efectuados para cada una de las condiciones del lecho previamente evaluadas en cuanto a la propagación del SEL. Los resultados obtenidos muestran que las diferentes hipótesis que pueden adoptarse sobre las profundidades tienen una influencia poco significativa en las distancias resultantes para cada grupo auditivo y especie.

Se presentan en la Tabla 15 a la Tabla 17 los valores de SPL_{peak} recibido para cada escenario de profundidades, donde se puede contrastar la evolución a lo largo de la distancia a la fuente con los umbrales correspondientes a PTS y TTS (Southall, 2019), así como a mortalidad de peces.

Como conclusión, considerando la métrica SPL el resultado más conservativo para toda el área de prospección de la distancia para PTS – VHF, es el obtenido para la emisión con Azimut 90° (perpendicular a la dirección de avance del arreglo), en la zona de máxima profundidad analizada, que es del orden de 800 m, dado que en la dirección alineada con el avance del arreglo (Azimut 0°) y en la dirección transversal (Azimut 45°) la distancia obtenida es mucho menor que ésta.



Tabla 15. Distancias a la fuente para alcanzar los diversos umbrales y grupos auditivos evaluados. Profundidad mínima Uniforme (B0).

Grupo Auditivo	SPLpeak	Azimut 0º	Azimut 45º	Azimut 90º
		Dip 85º	Dip 85º	Dip 85º
		Distancia	Distancia	Distancia
	dB re 1 µPa	(m)	(m)	(m)
PTS - LF	219	<50	<50	<50
PTS - HF	230	<50	<50	<50
PTS - VHF	202	114	64	599
PTS - PW	218	<50	<50	<50
PTS - PO	232	<50	<50	<50
Peces SIN vejiga natatoria *	213	<50	<50	75
Peces CON vejiga natatoria *	207	<50	<50	236
TTS - LF	213	<50	<50	75
TTS - HF	224	<50	<50	<50
TTS - VHF	196	370	217	1708
TTS - PW	212	<50	<50	89
TTS - PO	226	<50	<50	<50

* Nivel de mortalidad, mortalidad potencial y de recuperación de peces

Tabla 16. Distancias a la fuente para alcanzar los diversos umbrales y grupos auditivos evaluados. Profundidad Variable (BV8).

Grupo Auditivo	SPLpeak	Azimut 0º	Azimut 45º	Azimut 90º
		Dip 85º	Dip 85º	Dip 85º
		Distancia	Distancia	Distancia
	dB re 1 µPa	(m)	(m)	(m)
PTS - LF	219	<50	<50	<50
PTS - HF	230	<50	<50	<50
PTS - VHF	202	91	55	554
PTS - PW	218	<50	<50	<50
PTS - PO	232	<50	<50	<50
Peces SIN vejiga natatoria *	213	<50	<50	50
Peces CON vejiga natatoria *	207	<50	<50	180
TTS - LF	213	<50	<50	50
TTS - HF	224	<50	<50	<50
TTS - VHF	196	381	182	1656
TTS - PW	212	<50	<50	55
TTS - PO	226	<50	<50	<50

* Nivel de mortalidad, mortalidad potencial y de recuperación de peces



Tabla 17. Distancias a la fuente para alcanzar los diversos umbrales y grupos auditivos evaluados. Profundidad máxima Uniforme (BA).

Grupo Auditivo	SPLpeak dB re 1 μ Pa	Azimut 0°	Azimut 45°	Azimut 90°
		Dip 80°	Dip 80°	Dip 80°
		Distancia (m)	Distancia (m)	Distancia (m)
PTS - LF	219	<50	<50	<50
PTS - HF	230	<50	<50	<50
PTS - VHF	202	114	110	781
PTS - PW	218	<50	<50	<50
PTS - PO	232	<50	<50	<50
Peces SIN vejiga natatoria *	213	<50	<50	77
Peces CON vejiga natatoria *	207	56	54	263
TTS - LF	213	<50	<50	77
TTS - HF	224	<50	<50	<50
TTS - VHF	196	381	348	2973
TTS - PW	212	<50	<50	87
TTS - PO	226	<50	<50	<50

* Nivel de mortalidad, mortalidad potencial y de recuperación de peces

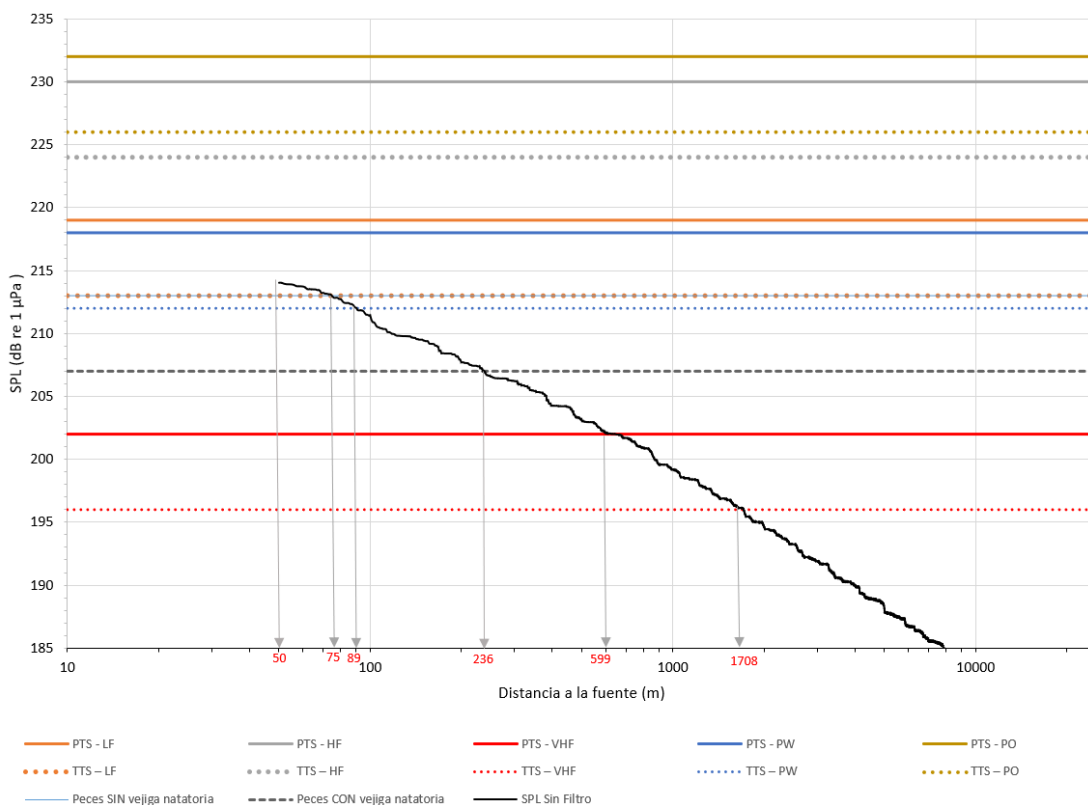


Figura 36. Ejemplo de comparación entre los valores de SPLpeakTOTAL y los diferentes umbrales para determinar las distancias correspondientes, para el escenario de Profundidad mínima Uniforme (B0)



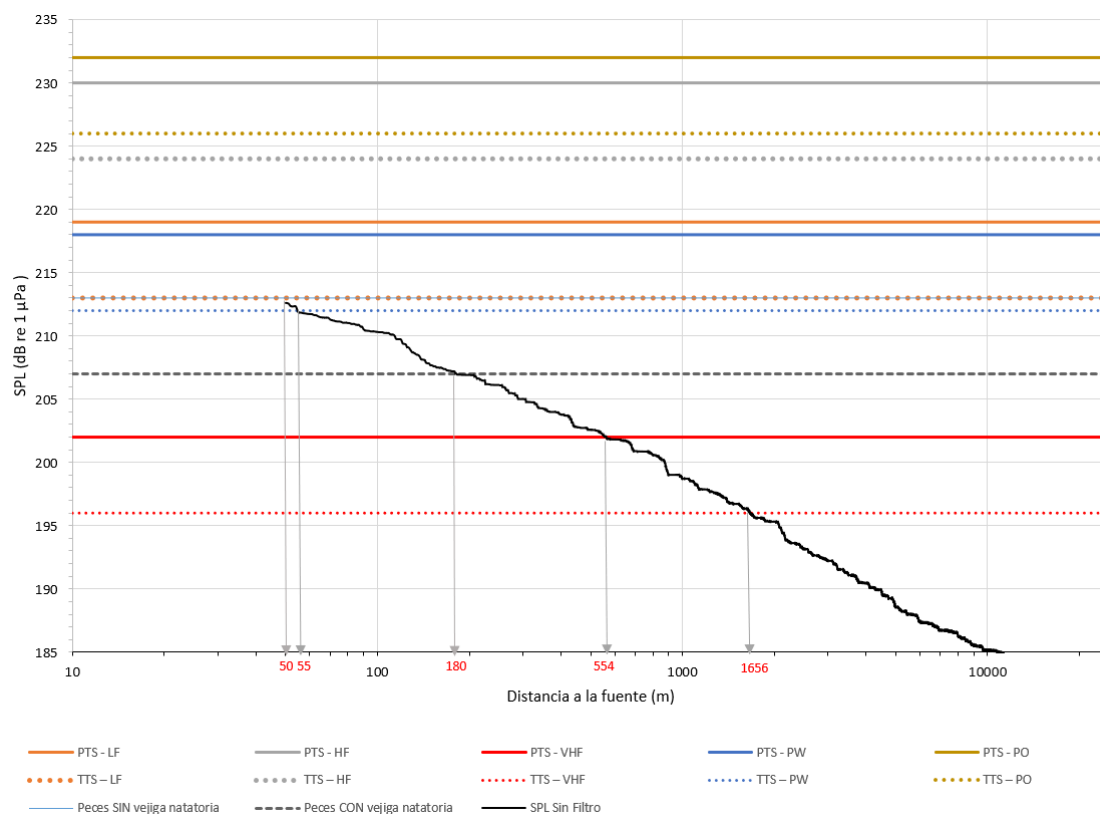


Figura 37. Comparación entre los valores de SPL_{peakTOTAL} y los diferentes umbrales para determinar las distancias correspondientes, para el escenario de Profundidad Variable (BV8)



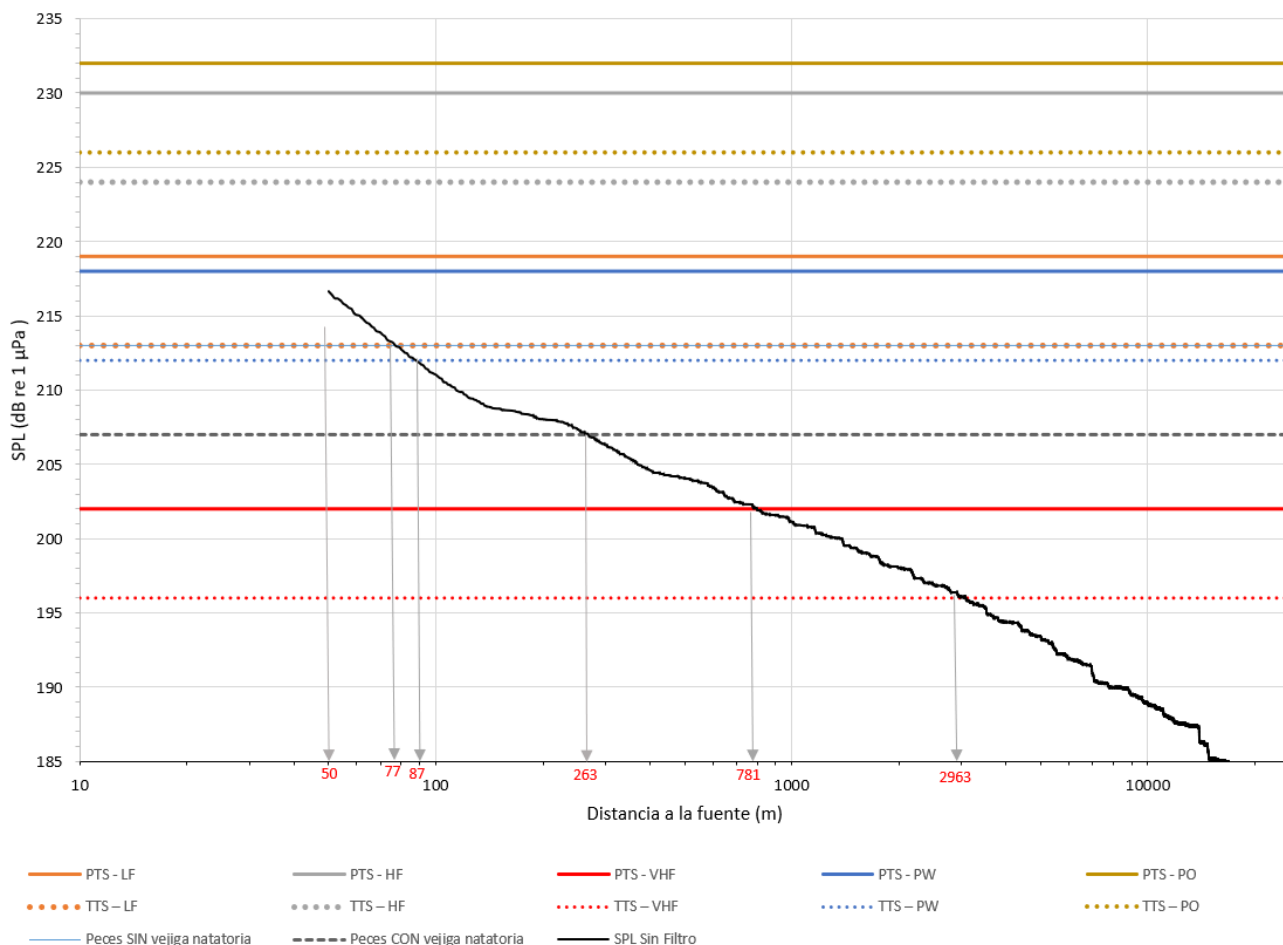


Figura 38. Comparación entre los valores de $SPL_{peakTOTAL}$ y los diferentes umbrales para determinar las distancias correspondientes, para el escenario de Profundidad máxima Uniforme (BA)

Para las secciones siguientes y el análisis del SEL acumulado (SEL_{cum}), se asumirá una distancia mínima de exclusión de mamíferos marinos para el inicio del aumento gradual de la emisión correspondiente a las medidas de mitigación igual a 1.000 m, el cual es el mínimo requerido por la normativa de aplicación, y es mayor que el valor de 800 m resultante del análisis para la métrica SPL.

La evaluación del SEL_{cum} estará orientada a verificar si esta distancia resulta suficiente para que no se produzca PTS en las diferentes especies de mamíferos marinos.

8 CÁLCULO DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN ACÚSTICA (SEL) ACUMULADO

8.1 METODOLOGÍA

El procedimiento para calcular la acumulación del SEL, que se suele denominar como “ SEL_{cum} ” en la bibliografía, consiste en ir sumando las contribuciones de cada emisión sísmica percibidas por el animal receptor del sonido, considerando la distancia al arreglo en la que se encuentra, el rango de profundidad en que se puede encontrar, la trayectoria de este, y su capacidad de percepción (audiograma).



En el presente estudio debido a la metodología adoptada para el cálculo del SEL, se considera el nivel más desfavorable que pueda presentarse a cualquier profundidad entre la superficie y el lecho, por lo que este criterio conservativo comprende cualquier evolución que el receptor haga en la dirección vertical.

Los valores individuales de SEL total que integran todas las bandas de energía ($RL(SEL_{TOTAL})$) según la ecuación [9], para cada emisión de aire comprimido “e”, se acumulan para todas las emisiones (N_e) que se realicen durante el período de prospección que se haya considerado.

El procedimiento consiste en sumar el SEL recibido para cada evento individual de emisión de acuerdo con la distancia “R” entre emisor y receptor y el ángulo de Azimut “α” con la trayectoria del arreglo ($RL_{R,\alpha}(e)$), obteniendo el SELcum a través de la siguiente ecuación:

$$SEL_{(ACUMULADO)} = \log_{10} \left[\sum_{e=1}^{N_e} 10^{\frac{RL_{R,\alpha}(e)}{10}} \right] \quad [10]$$

Según se indicó previamente, el valor de RL a ser considerado es el que ha sido ponderado por el audiograma correspondiente al grupo auditivo cuyo umbral de PTS o TTS se está evaluando.

En el caso de los peces, se emplea en cambio el valor sin filtrar.

Para la acumulación del SEL se considera la prospección de una línea sísmica, dado que no se justifica la acumulación por 24 horas, debido al tiempo que es necesario para relevarla y hacer el giro para pasar a la siguiente línea, a la distancia de más de 6 km entre líneas sucesivas (indicada en el Capítulo 4), y a la movilidad de los animales potencialmente expuestos.

De acuerdo a los estudios de Línea de Base, no se registra la presencia de colonias estáticas de alguna especie, ubicadas en inmediaciones del área de relevamiento y que pudieran ser afectadas por el sonido durante varias líneas sísmicas dentro de las mismas 24 horas.

Dado que la fuente sísmica se va alejando de los receptores, llega un punto en el cual ya no se acumula más SEL en forma significativa. Por lo tanto, la acumulación se realiza durante la duración necesaria para que el valor del SELcum alcance un valor máximo y se estabilice, lo cual suele suceder luego de una hora a una hora y media aproximadamente.

Si la posición del Emisor en un instante dado viene dada por las coordenadas X_E , Y_E , y la posición del receptor por las coordenadas X_R , Y_R , la distancia “R” entre ambos se calcula simplemente mediante la siguiente ecuación:

$$R = ((X_R - X_E)^2 + (Y_R - Y_E)^2)^{0.5} \quad [11]$$

Las posiciones de emisor y receptor van cambiando en el tiempo en función de su velocidad y dirección de avance. Si se asume que el emisor avanza en dirección del eje “X”, correspondiente a Azimut 0°, su coordenada “Y” será siempre nula.

La coordenada X en cambio se irá incrementando en el tiempo, a partir del punto de arranque (asumido como $X = 0$), de acuerdo con la velocidad del buque V_B (aproximadamente 4,5 nudos).

El procedimiento que se debe aplicar para el aumento gradual de la emisión se describe en detalle en el Capítulo 8 (ver 2.1 Programa de Monitoreo de Fauna Marina).

A medida que el receptor se mueve con una velocidad V_R modificando su posición espacial según el ángulo de su trayectoria con respecto al avance del buque, se produce una emisión de energía sonora cada aproximadamente 5 segundos, con lo cual a una velocidad V_E de unos 2,5 m/s el arreglo habrá avanzado 12,5 metros en dirección X positiva. De esa manera, continuamente se va modificando la distancia "R" entre ambos y el Azimut del receptor con respecto a la posición instantánea del emisor.

El esquema geométrico de cálculo implementado para acumular el SEL durante el período de escape del receptor es el siguiente:

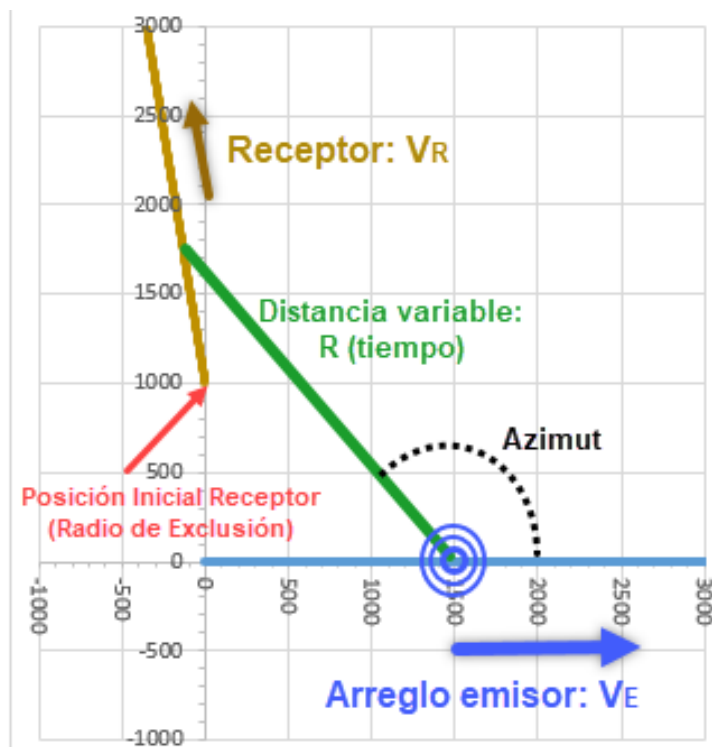


Figura 39. Esquema geométrico utilizado para el cálculo del SELcum

La información disponible sobre las posibles reacciones de los mamíferos marinos ante las emisiones sísmicas, presentada en el parágrafo 2.1.1 "Antecedentes de los potenciales efectos sobre la biota marina asociados a la emisión de energía sonora" del Capítulo 5 y en el parágrafo 4.2.1.2 "Comportamiento evasivo de los mamíferos marinos" del Capítulo 7, muestran que realizan trayectorias de evitación, pudiendo sostener velocidades del orden de 4 m/s durante períodos de aproximadamente media hora, manteniendo luego velocidades en el entorno de 2 m/s.

Para acumular el SEL se deben plantear hipótesis plausibles sobre la interrelación de las trayectorias del receptor y del emisor. Considerando los antecedentes disponibles y la información brindada en los parágrafos del Capítulo 5 y del Capítulo 7 previamente citados, se consideró que el receptor seguirá trayectorias con direcciones opuestas o perpendiculares a la dirección de avance del arreglo, de tal manera que lo alejen del punto de emisión.

Esta forma de cálculo del SELcum es la adoptada por ejemplo en la Figura 40 extraída de un reporte científico del Centro Danés para el Medio Ambiente y la Energía (Tougaard, J. 2016) donde se describe el procedimiento para acumulación del SEL durante un lapso de 2 horas mientras se realiza el relevamiento de una transecta.



Figure 4.1. Illustration of the relative movements of survey vessel (blue) and receiver (fleeing animal, red). During the time interval t , the ship moves the distance $l(0)-l(t)$, whereas the receiving animal moves distance $d(0)-d(t)$ in the direction perpendicular to the transect line. r is the radial distance from survey vessel to receiver at time t .

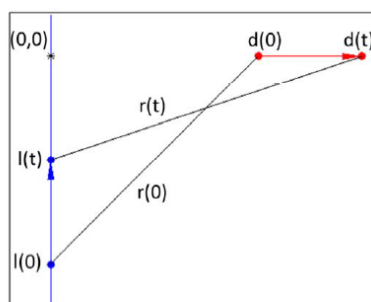


Figura 40. Ilustración del movimiento relativo del arreglo emisor (azul) y de receptor (animal en movimiento, rojo). Durante el intervalo de tiempo t , el arreglo se mueve una distancia $l(0) - l(t)$, mientras que el animal se mueve una distancia $d(0)-d(t)$ en dirección perpendicular a la línea de transecta. $r(t)$ es la distancia radial desde el arreglo al receptor al tiempo t .

Un procedimiento similar fue empleado por ejemplo en un EIA efectuado en un área poco profunda (2 a 5 metros) del mar Caspio (Azerbaijan) a unos 25 km de la costa, empleando múltiples arreglos en forma simultánea (Ward, P., 2015), como se ilustra en la siguiente figura.

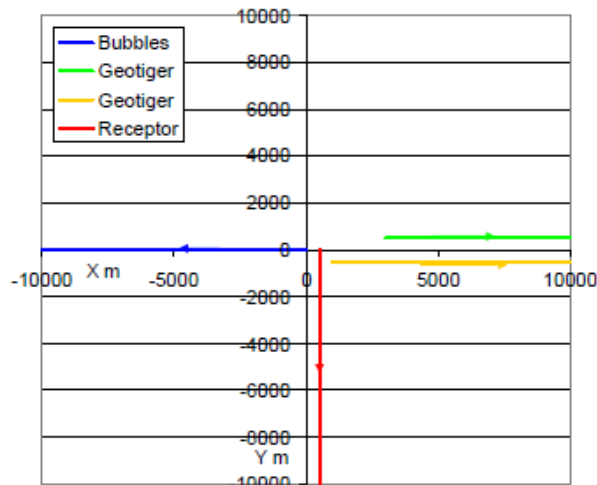


Figure 8.3: Relative locations and paths of receptor and source arrays for an initial Geotiger separation of 1000 m

Figura 41. Ejemplo de posiciones relativas y trayectorias del receptor y de los tres arreglos emisores (Ward, P., 2015).

Con respecto a los escenarios planteados, cabe recordar que según Southall (2019) existen dos condiciones para definir la zona de exclusión, basadas una en el SPL_{peak} no filtrado, y la otra en el SEL acumulado (métrica dual). Por consiguiente, habiendo definido a través del SPL_{peak} una distancia mínima de exclusión de 800 metros al inicio del aumento gradual, y siendo que la distancia mínima a ser adoptada en función de la normativa de aplicación es de 1.000 metros, no tiene sentido práctico plantear distancias menores para la evaluación del SEL_{cum}, por lo que solamente se plantearon escenarios de verificación de la superación de los umbrales de SEL_{cum} con una distancia inicial de 1.000 m.

Los resultados precedentes de evolución del SEL y del SPL, así como los gráficos polares de distribución angular de la energía sonora para frecuencias en octavas (32, 63, 125, 250, 500, 1.000 Hz) presentados en la Figura 26 del Capítulo 4, muestran claramente que cuando el receptor se encuentra en la zona cuyo azimut con respecto a la posición y dirección de avance del arreglo es cercana a los 90° / 270°, la energía emitida para frecuencias altas (125 Hz en adelante) es mayor que para azimuts más alineados con la dirección de avance (0° - 180°). Esta mayor emisión de energía está limitada a una zona de +/- 30° con respecto al Azimut 90° / 270°, mientras que fuera de ese rango, se registra en algunas frecuencias un descenso de la energía emitida con respecto tanto al Azimut 0° como 90° (por ejemplo, alrededor de 45°, 135°, -45° y -135°). Los espectros de emisión para 45° y los cálculos precedentes de SPL muestran también que la energía emitida en ese azimut es inferior a la emitida para 90°.

Por esa razón, para adoptar una metodología que tenga en cuenta los diagramas polares de emisión, se realizó un análisis combinado, considerando no sólo la distancia entre emisor y receptor para acumular el SEL de cada disparo, sino el ángulo (Azimut) relativo definido en la **Figura 39**.

Al respecto, se analizaron dos posibilidades:

- a) Metodología de emisión Dual: Una metodología de cálculo muy conservativa consiste en adoptar el resultado para Azimut 90° si el ángulo está comprendido entre 60° y 120° (o los mismos valores negativos), y Azimut 0° en el resto de los ángulos (0° a 60° y 120° a 180°). Cabe destacar que esta consideración maximiza la emisión para Azimuts diferentes de 0° y 90°, puesto que para otros ángulos intermedios el SEL emitido para frecuencias superiores a unos 100 Hz es sistemáticamente inferior al emitido para los ángulos extremos considerados, como se ha visto previamente.
- b) Metodología de emisión interpolada: Una metodología también conservativa, en el sentido de considerar la emisión máxima que se da para Azimut 90°, pero que se considera más representativa de la realidad, consiste en interpolar el valor del SEL para cada emisión entre los valores correspondientes a 0°, 45° y 90° según el valor del azimut.

Con respecto a la duración del aumento gradual, para este análisis se analizó la influencia de considerar 20 o 40 minutos, en los límites del intervalo recomendado. Se concluyó que en esta zona de bajas profundidades, resulta necesario que la duración del aumento gradual sea mayor a 20 minutos, aunque la duración mínima difiere según sea el procedimiento de cálculo aplicado, de las dos variantes descriptas previamente.

Cuando se considera el procedimiento de aumento gradual, es posible especificar que al principio los tiempos para el encendido de cada combinación sean más lentos que al final del proceso. En primer lugar se ha considerado que cada paso del encendido de las fuentes modelado por Nucleus se realiza en el mismo intervalo de tiempo que el anterior. Sin embargo, aplicando la metodología de emisión Dual resulta que para no superar el valor de PTS para mamíferos tipo LF, es necesario que el proceso de aumento gradual sea más lento al principio, y más rápido al final, lo cual se representó considerando que en los primeros 25 minutos del arranque se alcance a la combinación 11, correspondiente a la emisión de fuentes hasta 540 cu.in. (8,85 lt.), mientras que en el resto de la duración del proceso se completen las combinaciones restantes hasta llegar a 2.010 cu.in. (32,94 lt.).



Empleando la metodología de emisión Interpolada entre 0°, 45° y 90°, para las condiciones de profundidad mínima uniforme (B0) y variable (BV8) la variación de la cantidad de fuentes en el tiempo no tiene esa restricción para obtener un valor de SELcum inferior al PTS para LF, la misma puede ser lineal (cada combinación se activa en el mismo tiempo), lo cual se ha denominado como “equiespaciado” en las tablas correspondientes.

Para la condición de profundidad máxima uniforme en cambio, fue necesario considerar una variación gradual más lenta, lo cual se representó considerando que en los primeros 20 minutos del aumento gradual se alcance a la combinación 10, correspondiente a la emisión de fuentes hasta 480 cu.in. (7,87 lt.), mientras que en el resto de la duración del proceso se completen las combinaciones restantes hasta llegar a 2.010 cu.in. (32,94 lt.). Con esta configuración se alcanzó una duración mínima del proceso de aumento gradual de 30 minutos, sin necesidad de asumir una velocidad inicial de escape de 4 m/s durante 30 minutos.

En primer lugar, y solamente para ilustrar el proceso de acumulación y la influencia de realizar, o no, el procedimiento de aumento gradual, se muestran los pasos de acumulación del SEL en el caso particular en que el animal receptor se encuentre a 1.000 m de distancia del centro del arreglo, ubicado inicialmente en la dirección opuesta al avance de este, y que se desplace con una velocidad de 2 m/s cuando se inicia el aumento gradual.

Se asume además que en este ejemplo ilustrativo el receptor se detiene al finalizar el aumento gradual (habiendo recorrido casi 5 km), dado que el arreglo se está alejando del mismo (la distancia al receptor es de casi 11 km) y el SEL recibido en cada emisión es bajo y cada vez menor.

El azimut del emisor es 0° y el del receptor es 180° durante todo el tiempo. La zona es la correspondiente a profundidad máxima (BA). Con todas estas hipótesis, se tienen los siguientes resultados:

La Figura 42 muestra la lenta progresión del SEL recibido durante el aumento gradual. Se puede visualizar un incremento brusco que se produce cada vez que se activa una combinación adicional de emisores, seguido de períodos de decaimiento durante los cuales el SEL recibido va descendiendo debido al incremento de la distancia R entre emisor y receptor. Al final del período de aumento gradual se alcanza el máximo de SEL recibido, y luego en cada emisión (cada 5 segundos) el SEL recibido va descendiendo mientras se incrementa la distancia R.

La Figura 43 ilustra el SEL acumulado que se obtiene sumando (en el dominio lineal) el SEL de cada una de las emisiones efectuadas, como se explicó previamente (ecuación [10]). El SELcum que en este caso más se acerca al valor de PTS es el correspondiente a mamíferos de grupo auditivo bajo (LF). Siendo PTS LF = 183 dB re 1 μPa^2 s, el SELcum alcanza solamente 179,7 re 1 μPa^2 s, 3,3 dB más bajo. Esa acumulación incluye 172,8 dB re 1 μPa^2 s que se acumulan durante el período de aumento gradual.

A modo de comparación para mostrar la influencia del aumento gradual, se calculó el SEL recibido y acumulado para la hipótesis teórica en que no se efectuara esa medida de mitigación. La Figura 44 ilustra como sería el SEL recibido durante esos 40 minutos, pudiéndose apreciar como desciende sistemáticamente desde un valor máximo que se tendría si, con el receptor a una distancia de 1.000 metros del emisor, se comenzara a emitir sonido con la máxima potencia.



A su vez, la Figura 45 muestra el SEL acumulado bajo esa hipótesis, que alcanzaría un total de 183,7 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{ s}$, es decir, 4 dB mayor que con el aumento gradual. En este ejemplo se supera el valor de PTS LF, y queda claro que la mayor acumulación de SEL durante el período correspondiente al aumento gradual si se emitiera a plena potencia (que alcanza 182,0 dB re 1 μPa^2), termina provocando un mayor SEL total acumulado, por lo que una situación que con el aumento gradual no provocaría superación del PTS, podría superarlo si el aumento gradual hipotéticamente no se efectuara.

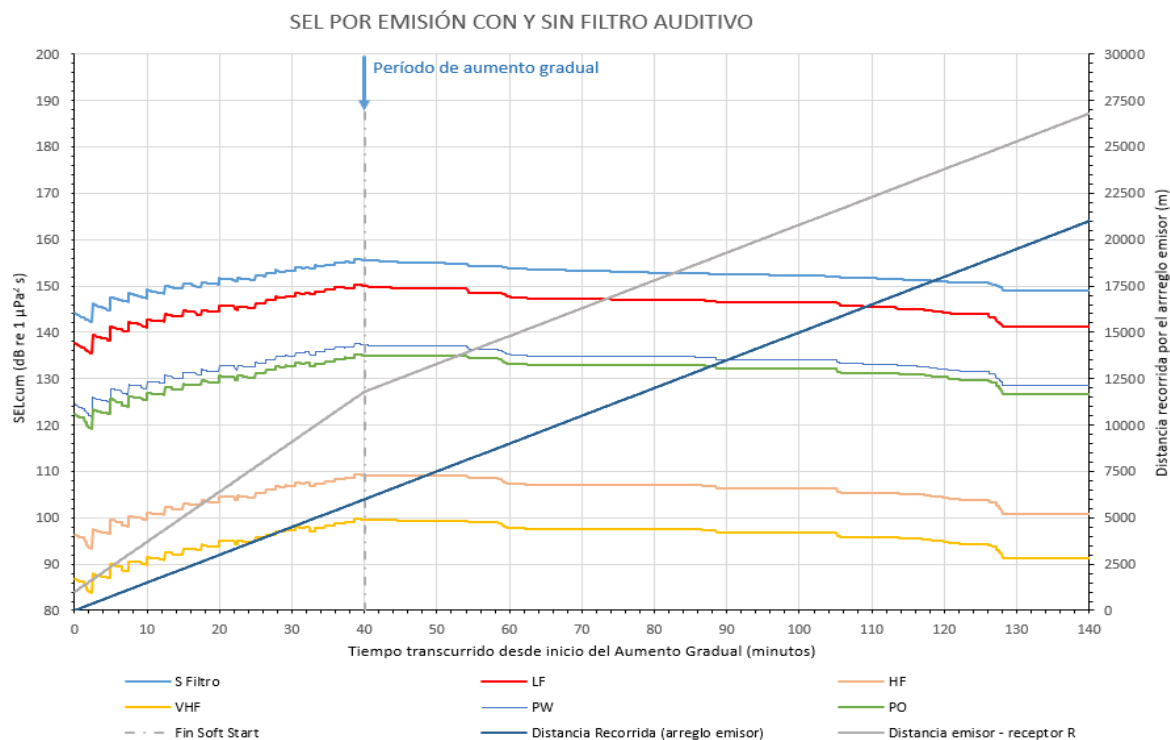


Figura 42. SEL recibido por cada emisión. Aumento Gradual 40 minutos. Azimut movimiento del receptor 180° a 2 m/s durante el Aumento Gradual únicamente. Profundidad máxima (BA)



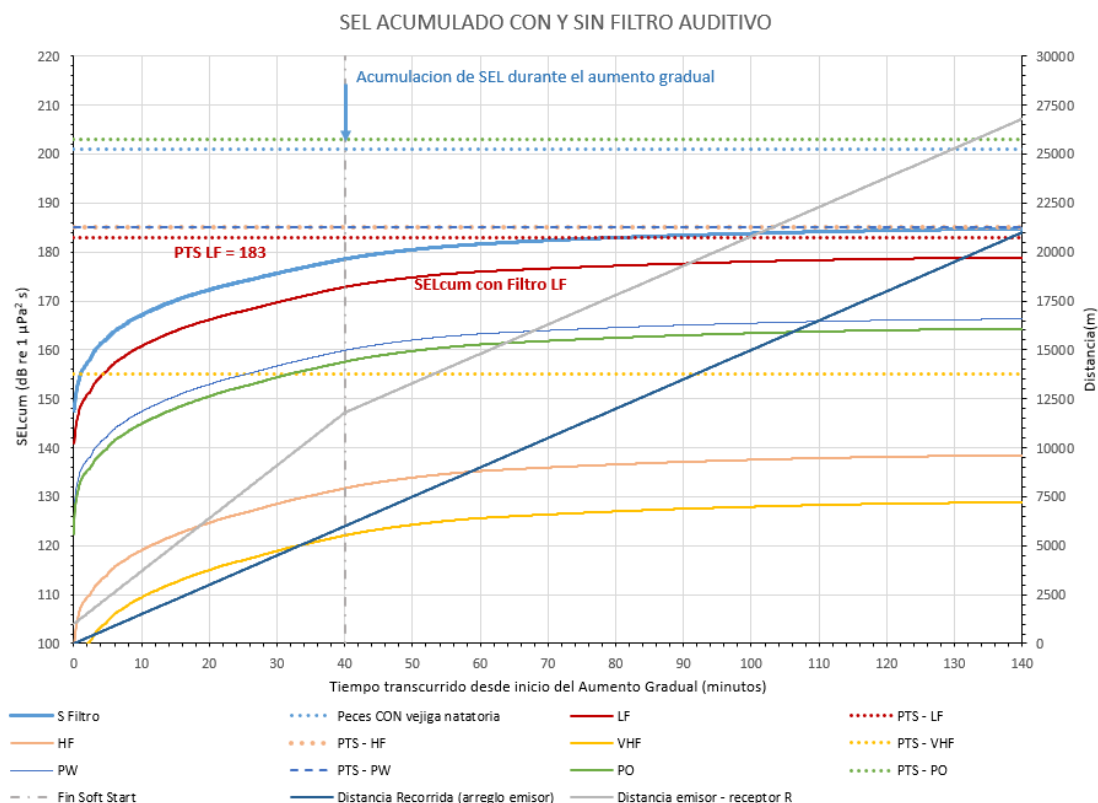


Figura 43. SEL acumulado. Aumento Gradual 40 minutos. Azimut movimiento del receptor 180° a 2 m/s durante el Aumento Gradual únicamente. Profundidad máxima (BA)

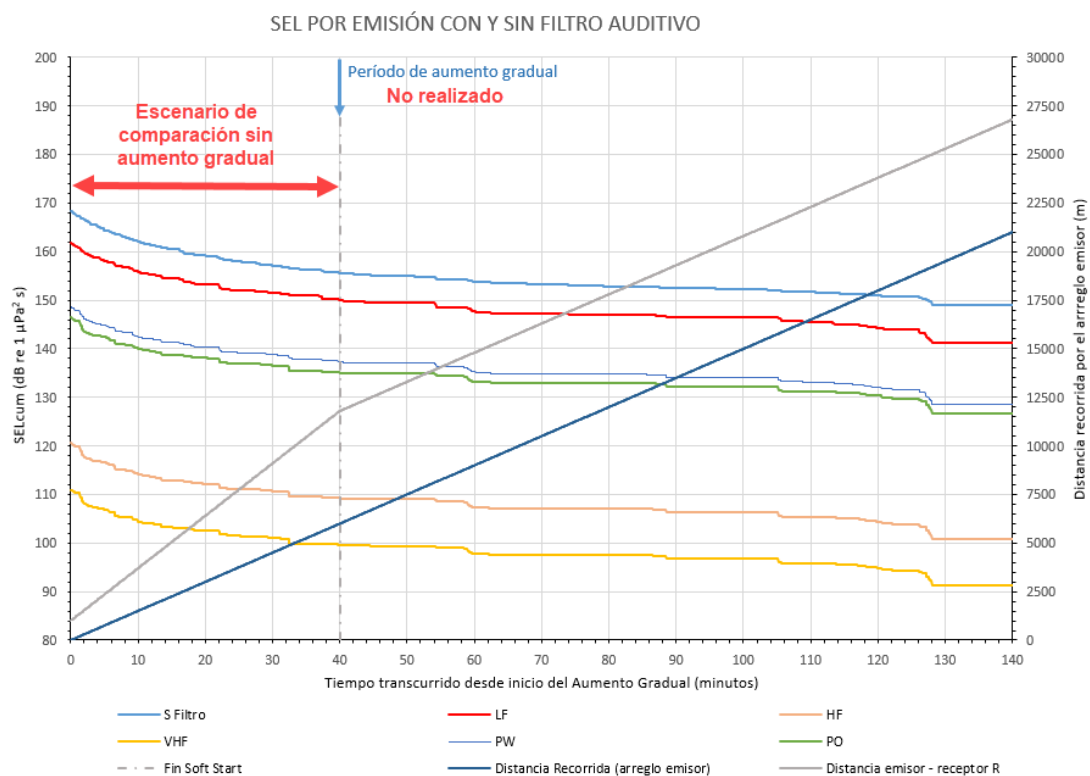
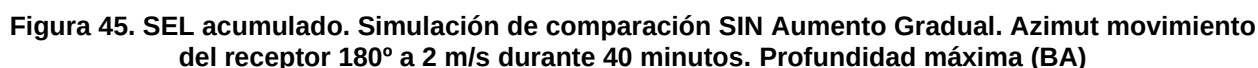


Figura 44. SEL recibido por cada emisión. Simulación de comparación SIN Aumento Gradual. Azimut movimiento del receptor 180° a 2 m/s durante 40 minutos. Profundidad máxima (BA)



Cualquier ángulo de escape en dirección contraria al avance del arreglo ($>90^\circ$) genera un SELcum menor al obtenido con las hipótesis previas. Si bien hay también un rango de ángulos de escape en dirección al avance del arreglo ($<90^\circ$) para los cuales no se supera el PTS LF (que es la condición más restrictiva), no se considera realista que el receptor mantenga esas trayectorias durante un tiempo prolongado, dado el comportamiento evasivo de los mamíferos marinos. Las figuras siguientes ilustran la acumulación del SEL para las diferentes condiciones ensayadas.

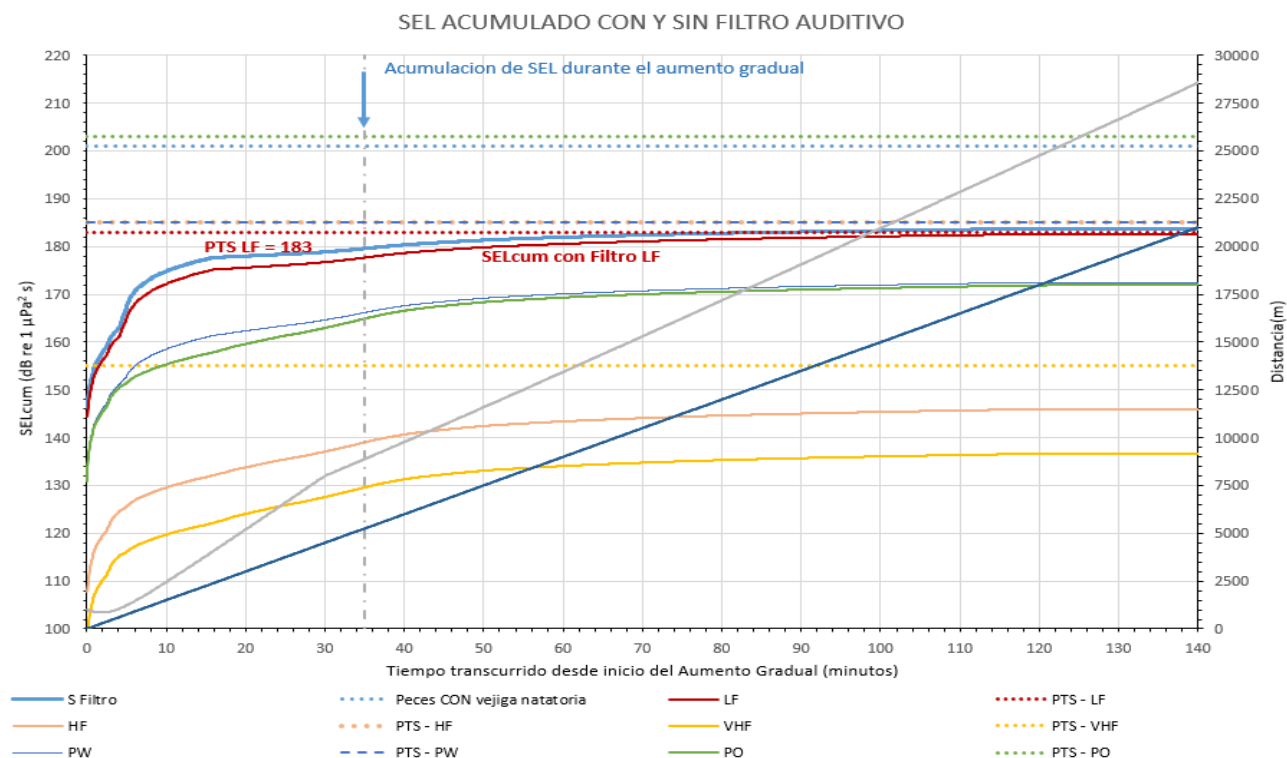


Figura 46. SEL acumulado Emisión Dual. Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1.000 m del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s. Azimut movimiento del receptor 90°. Profundidad mínima Uniforme (B0).

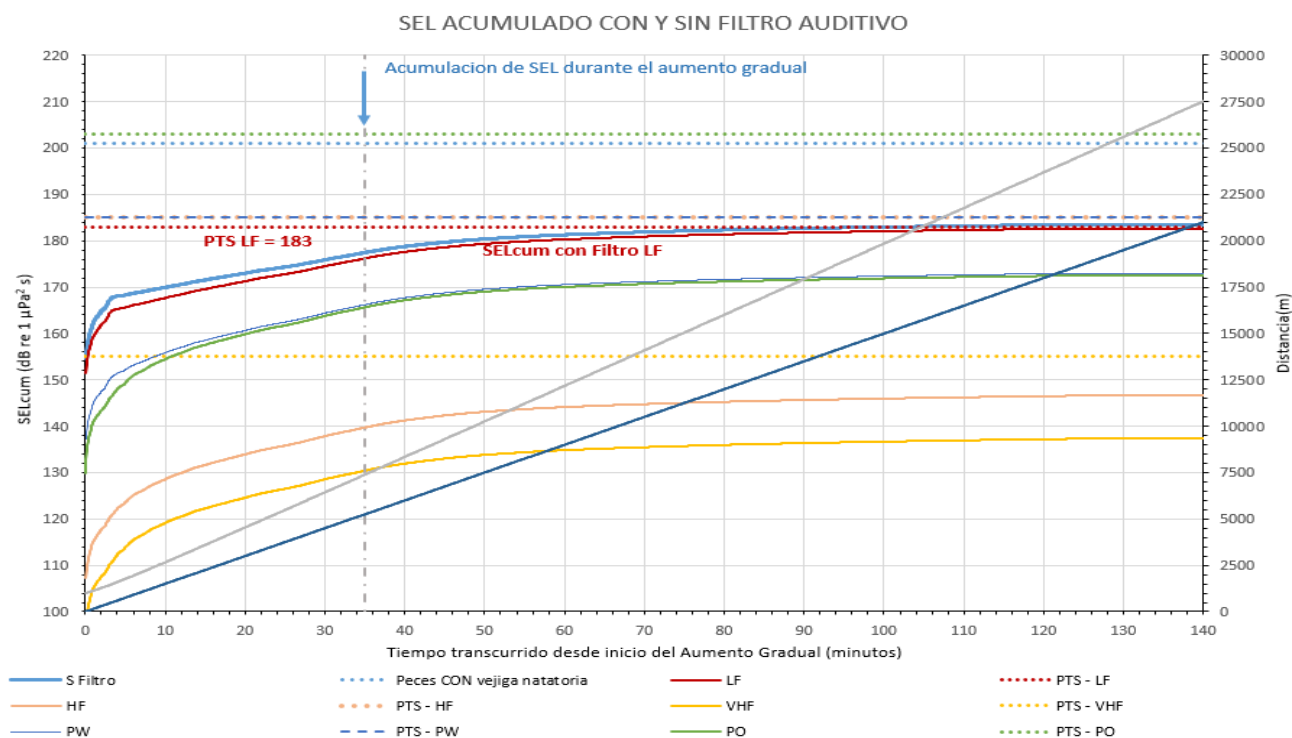


Figura 47. SEL acumulado Emisión Dual. Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Azimut movimiento del receptor 90°. Velocidad del receptor 2 m/s constante. Profundidad mínima Uniforme (B0).



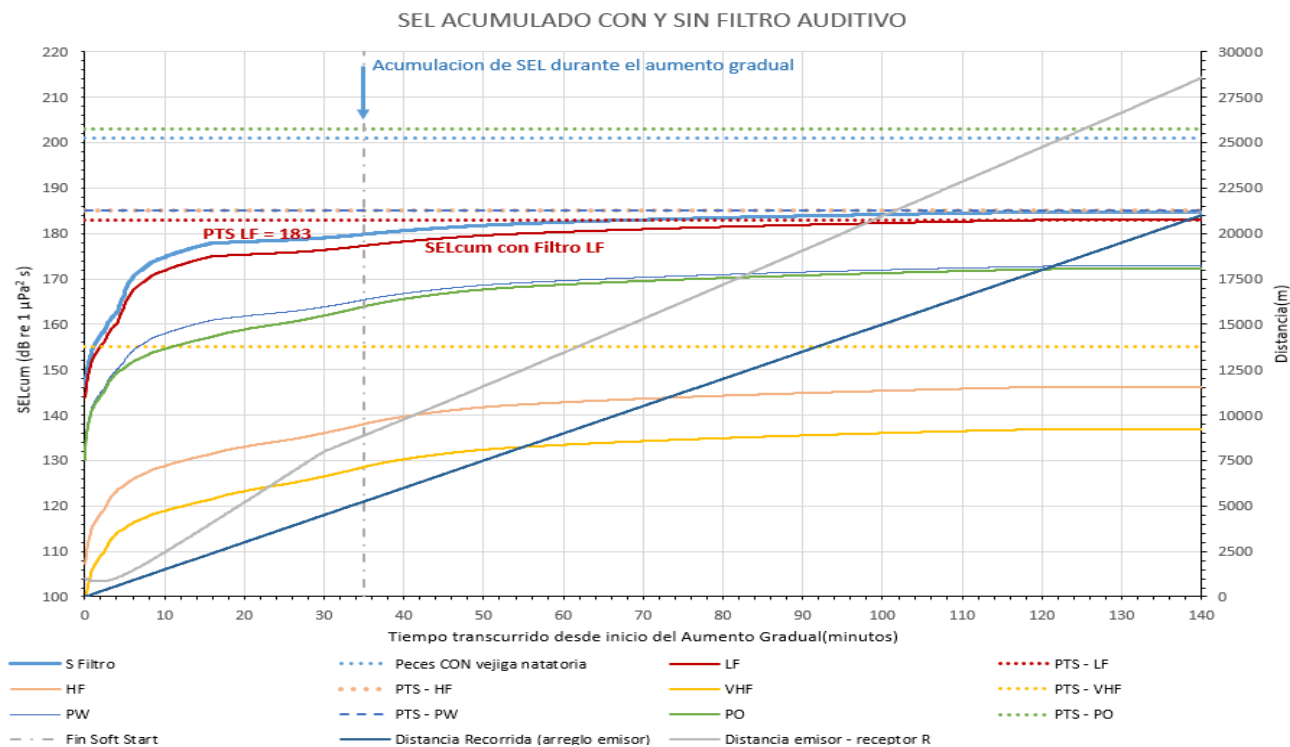


Figura 48. SEL acumulado Emisión Dual. Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1.000 m del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s. Azimut movimiento del receptor 90°. Profundidad variable (BV8).

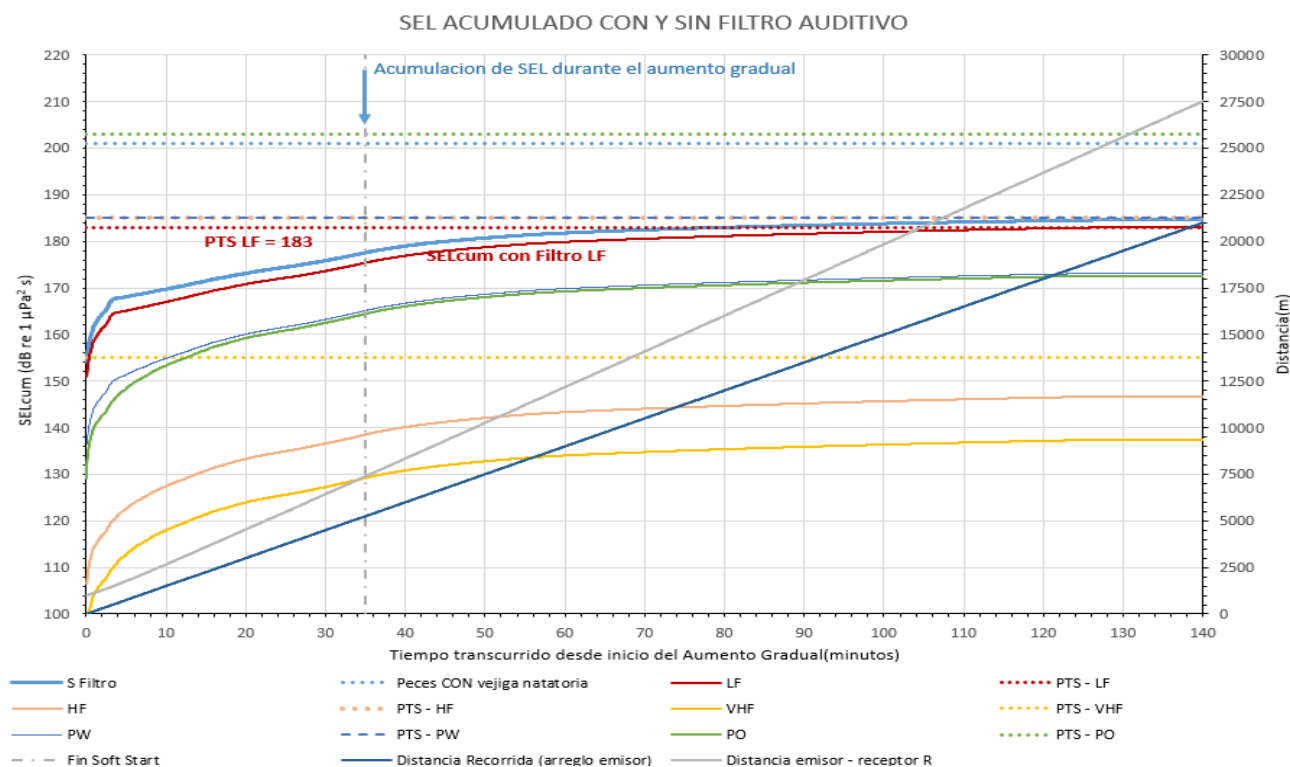


Figura 49. SEL acumulado Emisión Dual. Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Azimut movimiento del receptor 90°. Velocidad del receptor 2 m/s constante. Profundidad variable (BV8).



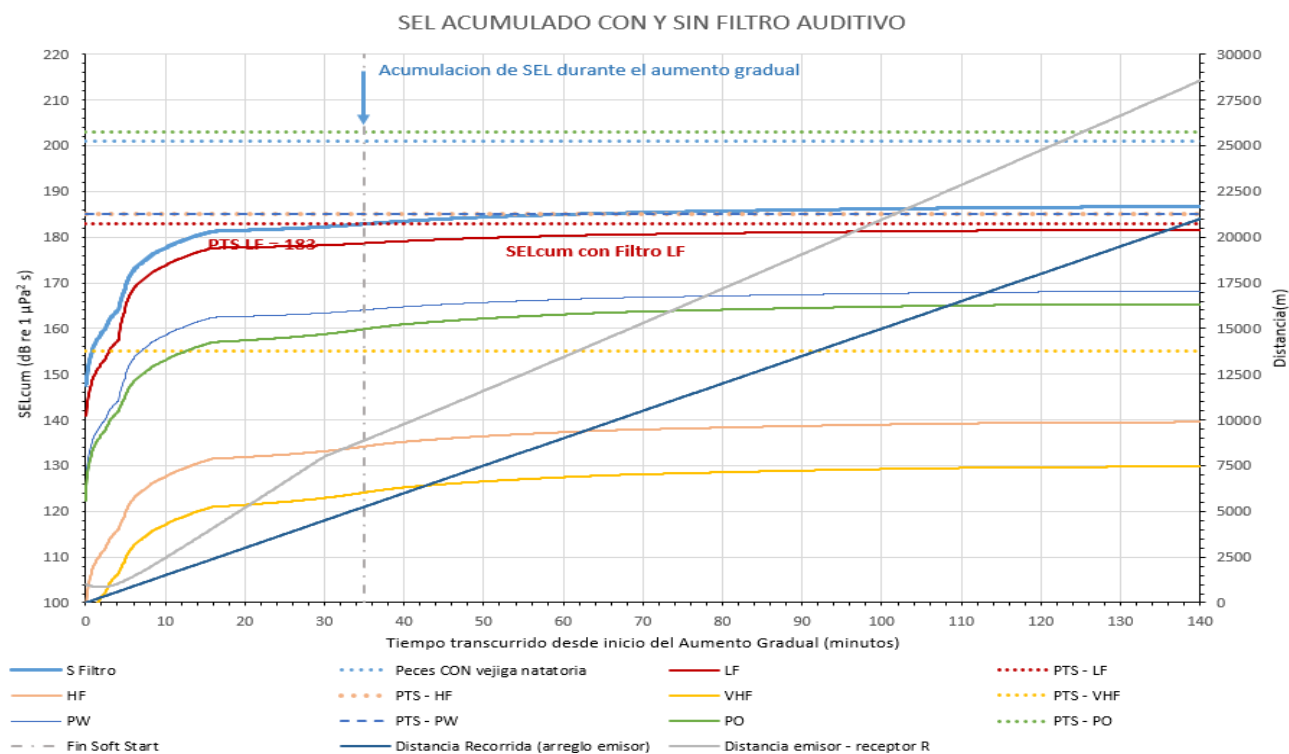


Figura 50. SEL acumulado Emisión Dual. Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1.000 m del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s. Azimut movimiento del receptor 90°. Profundidad máxima Uniforme (BA).

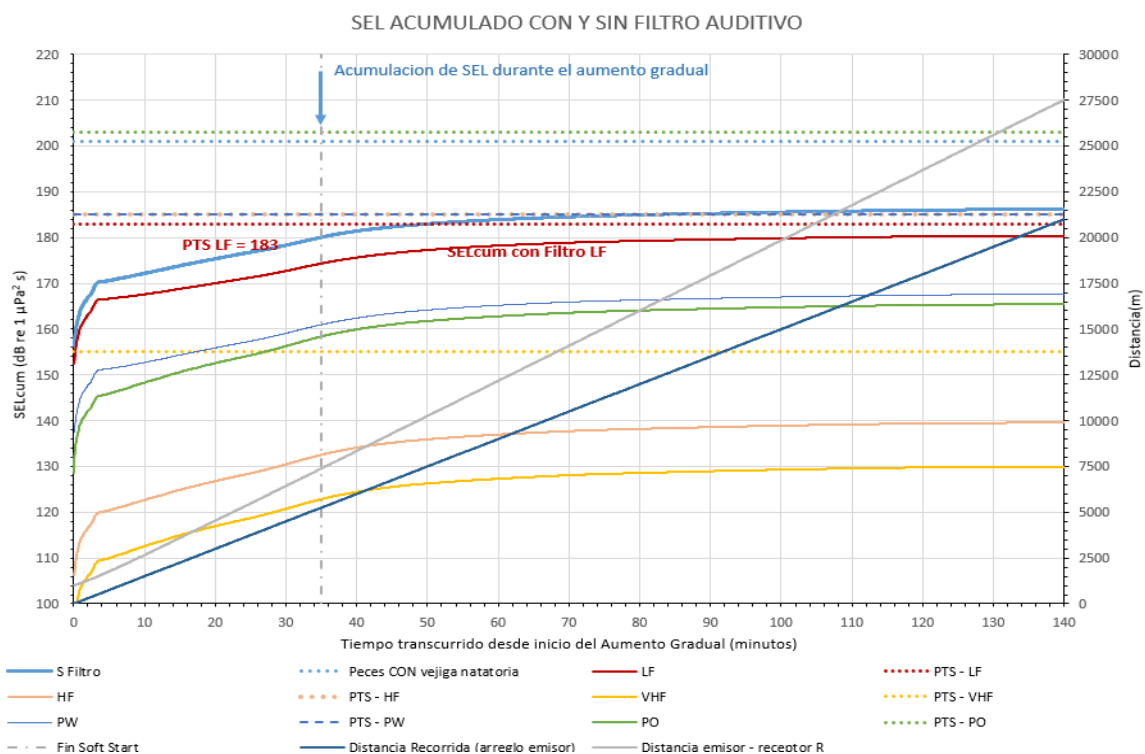


Figura 51. SEL acumulado Emisión Dual. Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Azimut movimiento del receptor 90°. Velocidad del receptor 2 m/s constante. Profundidad máxima Uniforme (BA).



De la Tabla 18 a la Tabla 20 se presentan los valores de SELcum obtenidos bajo diferentes hipótesis de punto inicial y trayectoria del receptor, así como duración del aumento gradual, bajo las tres condiciones de profundidad analizadas. Las trayectorias del receptor se suponen perpendiculares a la línea de avance y arrancan a 1.000 m del punto de inicio del aumento gradual. Se incluyen los casos en que es suficiente con que la velocidad de escape sea de 2 m/s constante sin superar el valor de PTS LF (183 dB re 1 μPa^2 s), que en todos los casos es el más restrictivo. Los casos en los cuales el receptor se halla en la línea de avance del arreglo son las más exigentes, y con esta metodología de cálculo se debería considerar la hipótesis de una velocidad mayor (4 m/s) durante 30 minutos para obtener un SELcum LF inferior al límite de PTS. En caso de que las trayectorias tengan un ángulo mayor a 90° respecto a la línea de avance (es decir, el animal se aleje del emisor con un ángulo en sentido contrario a su dirección de avance), los valores de SELcum obtenidos son más bajos.

Se puede apreciar que la reducción de la duración del aumento gradual desde el máximo de 40 minutos al mínimo de 20 minutos implica un incremento en el SELcum con filtro LF superándose el PTS LF para mamíferos de baja frecuencia auditiva. Para el resto de los mamíferos marinos no se supera el umbral PTS y en general ni siquiera se supera el umbral TTS (con excepción de los Carnívoros Fócidos PW). Se analizaron duraciones menores del arranque suave, encontrándose que para cumplir con la limitante de los mamíferos tipo LF el período de aumento gradual no debería ser inferior a 35 minutos conforme a esta conservativa metodología de emisión dual.

Por otra parte, la situación hipotética de no realizar aumento gradual conllevaría la superación del PTS LF en más de 8 dB según la profundidad, lo cual ilustra la importancia que tiene esa medida, para poder alejar a los mamíferos marinos antes de iniciar la emisión a plena potencia.



Tabla 18. Valores de SELcum (dB re 1 μPa^2 s) comparados con los umbrales de PTS para mamíferos y límites para peces. Profundidad mínima Uniforme (B0). Metodología de Emisión Dual.

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Umbrales de comparación	Peces SIN VN	PTS - LF	PTS - HF	PTS - VHF	PTS - PW	PTS - PO
	219	183	185	155	185	203
	Peces CON VN	TTS - LF	TTS - HF	TTS - VHF	TTS - PW	TTS - PO
	201	168	170	140	170	188
Aumento Gradual 20 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s						
SELcum	187,6	185,9	147,7	138,3	174,7	173,6
Diferencia PTS	-13,4	2,9	-37,3	-16,7	-10,3	-29,4
Aumento Gradual 40 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s						
SELcum	183,6	182,5	145,8	136,5	172,3	171,7
Diferencia PTS	-17,4	-0,5	-39,2	-18,5	-12,7	-31,3
Aumento Gradual 40 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	185,2	184,0	147,5	138,2	174,0	173,4
Diferencia PTS	-15,8	1,0	-37,5	-16,8	-11,0	-29,6
Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s						
SELcum	183,7	182,6	146,0	136,7	172,5	171,9
Diferencia PTS	-17,3	-0,4	-39,0	-18,3	-12,5	-31,1
Sin Aumento Gradual. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s						
SELcum	193,6	191,3	151,3	141,8	179,0	177,2
Diferencia PTS	-7,4	8,3	-33,7	-13,2	-6,0	-25,8
Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	183,6	182,7	146,6	137,3	173,0	172,6
Diferencia PTS	-17,4	-0,3	-38,4	-17,7	-12,0	-30,4
Aumento Gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s						
SELcum	183,1	182,2	146,0	136,7	172,4	171,9
Diferencia PTS	-17,9	-0,8	-39,0	-18,3	-12,6	-31,1
Aumento Gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Velocidad del receptor 2 m/s constante						
SELcum	184,6	183,7	147,5	138,3	174,0	173,5
Diferencia PTS	-16,4	0,7	-37,5	-16,7	-11,0	-29,5
Aumento Gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, en el lado opuesto de la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s						
SELcum	182,9	182,1	146,1	136,9	172,5	172,1
Diferencia PTS	-18,1	-0,9	-38,9	-18,1	-12,5	-30,9
Aumento Gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, en el lado opuesto de la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s constante.						
SELcum	184,4	183,5	147,4	138,2	173,8	173,4
Diferencia PTS	-16,6	0,5	-37,6	-16,8	-11,2	-29,6



Tabla 19. Valores de SELcum (dB re 1 μPa^2 s) comparados con los umbrales de PTS para mamíferos y límites para peces. Profundidad variable (BV8). Metodología de Emisión Dual.

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Umbrales de comparación	Peces SIN VN	PTS - LF	PTS - HF	PTS - VHF	PTS - PW	PTS - PO
	219	183	185	155	185	203
	Peces CON VN	TTS - LF	TTS - HF	TTS - VHF	TTS - PW	TTS - PO
	201	168	170	140	170	188
Aumento Gradual 20 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s						
SELcum	188,2	185,9	147,6	138,2	174,6	173,5
Diferencia PTS	-12,8	2,9	-37,4	-16,8	-10,4	-29,5
Aumento Gradual 40 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s						
SELcum	184,6	182,9	146,1	136,8	172,7	172,0
Diferencia PTS	-16,4	-0,1	-38,9	-18,2	-12,3	-31,0
Aumento Gradual 40 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	185,9	184,0	147,3	138,0	173,9	173,3
Diferencia PTS	-15,1	1,0	-37,7	-17,0	-11,1	-29,7
Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s						
SELcum	184,8	183,0	146,2	136,9	172,8	172,2
Diferencia PTS	-16,2	0,0	-38,8	-18,1	-12,2	-30,8
Sin Aumento Gradual. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s						
SELcum	193,7	191,0	150,8	141,3	178,5	176,6
Diferencia PTS	-7,3	8,0	-34,2	-13,7	-6,5	-26,4
Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	184,6	183,0	146,7	137,4	173,1	172,6
Diferencia PTS	-16,4	0,0	-38,3	-17,6	-11,9	-30,4
Aumento Gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s						
SELcum	184,2	182,6	146,2	136,9	172,7	172,2
Diferencia PTS	-16,8	-0,4	-38,8	-18,1	-12,3	-30,8
Aumento Gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Velocidad del receptor 2 m/s constante						
SELcum	185,5	183,7	147,4	138,1	173,9	173,3
Diferencia PTS	-15,5	0,7	-37,6	-16,9	-11,1	-29,7
Aumento Gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, en el lado opuesto de la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s						
SELcum	184,1	182,5	146,3	137,0	172,8	172,2
Diferencia PTS	-16,9	-0,5	-38,7	-18,0	-12,2	-30,8
Aumento Gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, en el lado opuesto de la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s constante.						
SELcum	185,3	183,6	147,3	138,0	173,8	173,2
Diferencia PTS	-15,7	0,6	-37,7	-17,0	-11,2	-29,8



Tabla 20. Valores de SELcum (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{ s}$) comparados con los umbrales de PTS para mamíferos y límites para peces. Profundidad máxima Uniforme (BA). Metodología de Emisión Dual.

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Umbrales de comparación	Peces SIN VN	PTS - LF	PTS - HF	PTS - VHF	PTS - PW	PTS - PO
	219	183	185	155	185	203
	Peces CON VN	TTS - LF	TTS - HF	TTS - VHF	TTS - PW	TTS - PO
	201	168	170	140	170	188
Aumento Gradual 20 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s						
SELcum	191,5	186,2	143,5	133,7	172,3	169,3
Diferencia PTS	-9,5	3,2	-41,5	-21,3	-12,7	-33,7
Aumento Gradual 40 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s						
SELcum	187,5	182,0	140,1	130,4	168,6	165,9
Diferencia PTS	-13,5	-1,0	-44,9	-24,6	-16,4	-37,1
Aumento Gradual 40 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	188,3	182,5	141,1	131,4	169,3	166,9
Diferencia PTS	-12,7	-0,5	-43,9	-23,6	-15,7	-36,1
Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	188,4	182,6	141,2	131,6	169,5	167,1
Diferencia PTS	-12,6	-0,4	-43,8	-23,4	-15,5	-35,9
Sin Aumento Gradual. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad inicial del receptor 4 m/s durante 30 minutos y luego 2 m/s						
SELcum	196,6	192,4	147,3	137,1	177,5	172,9
Diferencia PTS	-4,4	9,4	-37,7	-17,9	-7,5	-30,1
Aumento Gradual 35 minutos (Combinación 11 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Velocidad del receptor 2 m/s constante						
SELcum	187,2	181,0	140,3	130,7	168,3	166,1
Diferencia PTS	-13,8	-2,0	-44,7	-24,3	-16,7	-36,9
Aumento Gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Velocidad del receptor 2 m/s constante						
SELcum	188,0	181,9	141,0	131,4	169,1	166,8
Diferencia PTS	-13,0	-1,1	-44,0	-23,6	-15,9	-36,2
Aumento Gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, en el lado opuesto de la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s constante.						
SELcum	187,8	181,6	140,9	131,3	168,9	166,7
Diferencia PTS	-13,2	-1,4	-44,1	-23,7	-16,1	-36,3



En los casos en que el receptor está a 1.000 m del punto de inicio del aumento gradual, pero perpendicular a la trayectoria del arreglo, el aumento gradual podría ser equiespaciado e incluso tener sólo 30 minutos de duración, si se considera la hipótesis de que el animal puede desarrollar una velocidad de escape de 4 m/s durante 30 minutos. En caso contrario, si la velocidad fuera 2 m/s todo el tiempo, se requiere que el ritmo de incremento de la emisión sea más lento, no superando la combinación 11 de las 22 en los primeros 25 minutos, y el resto en los 10 minutos siguientes, totalizando 35 minutos como máximo, según esta metodología de emisión dual.

En relación con los **peces**, se verifica que si se encontraran a 50 metros del arreglo en el momento de inicio del aumento gradual (mínima distancia evaluada) y en un punto perpendicular a la dirección de avance, aún cuando no se desplazaran de ese sitio, el movimiento del emisor generaría un SELcum 0,8 dB más bajo que el umbral de mortalidad potencial 201 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{ s}$ (sin filtro auditivo) correspondiente a peces con vejiga natatoria (CON VN en la tabla).

En caso de encontrarse peces con vejiga natatoria en cercanías de la línea de relevamiento mientras que el mismo se está desarrollando a plena potencia, no se alcanzaría el umbral de mortalidad potencial 201 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{ s}$ (SEL sin filtro auditivo), incluso en caso de hallarse a una distancia de 50 metros de la línea y permanecer estáticos mientras que el arreglo se acerca y aleja al punto de mínima distancia (situación poco probable puesto que los antecedentes indican que se produce comportamiento evasivo).

Esta situación se ilustra en la Figura 52 y la Figura 53 donde se ha simulado la acumulación del SEL para peces estáticos ubicados en el km 10 de la línea de relevamiento (se puede apreciar como la distancia R va disminuyendo y aumentando con el tiempo a medida que el arreglo se desplaza), en la zona de mínimas profundidades. Tampoco se alcanzaría el valor umbral para peces sin vejiga natatoria igual a 219 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{ s}$ (sin filtro auditivo).

Cabe recordar además, que la energía emitida en cercanías del arreglo es menor que la que surge de los cálculos de campo lejano, que es la que se evalúa en este estudio. Estos resultados sugieren que una afectación de los peces que implique potencialmente la mortalidad de estos se produciría en un entorno muy localizado alrededor del arreglo.



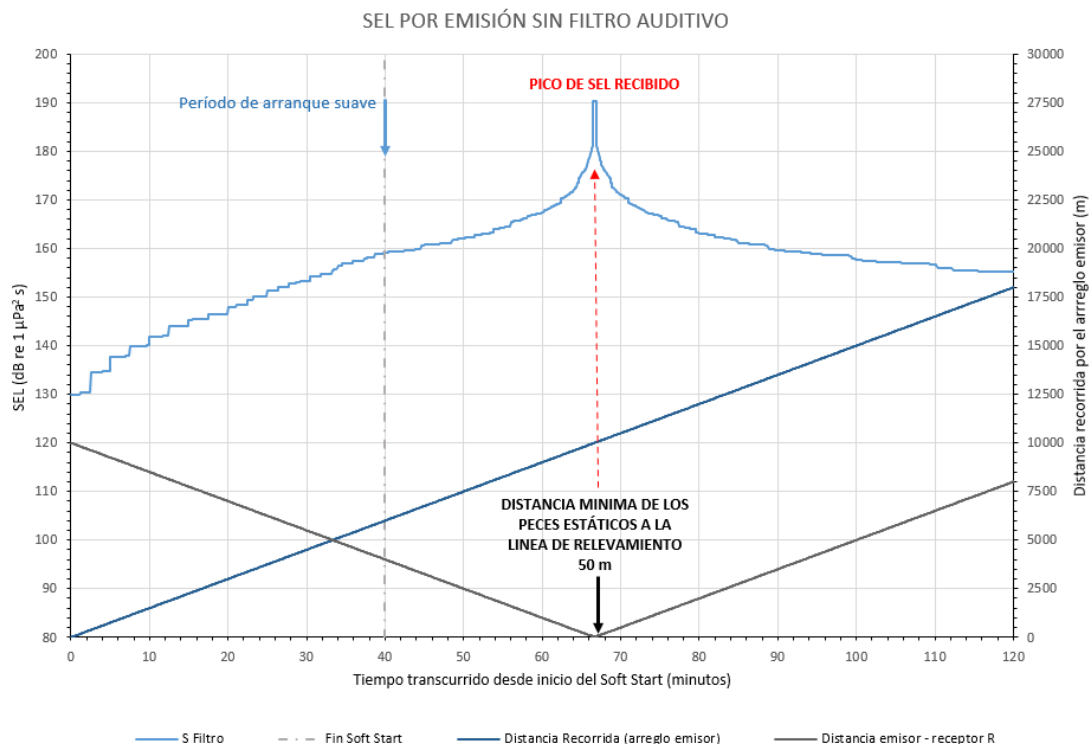


Figura 52. SEL recibido por emisión por peces, considerando que se encuentran ubicados a 50 m de la línea de relevamiento. Ejemplo para Profundidad mínima Uniforme (B0).

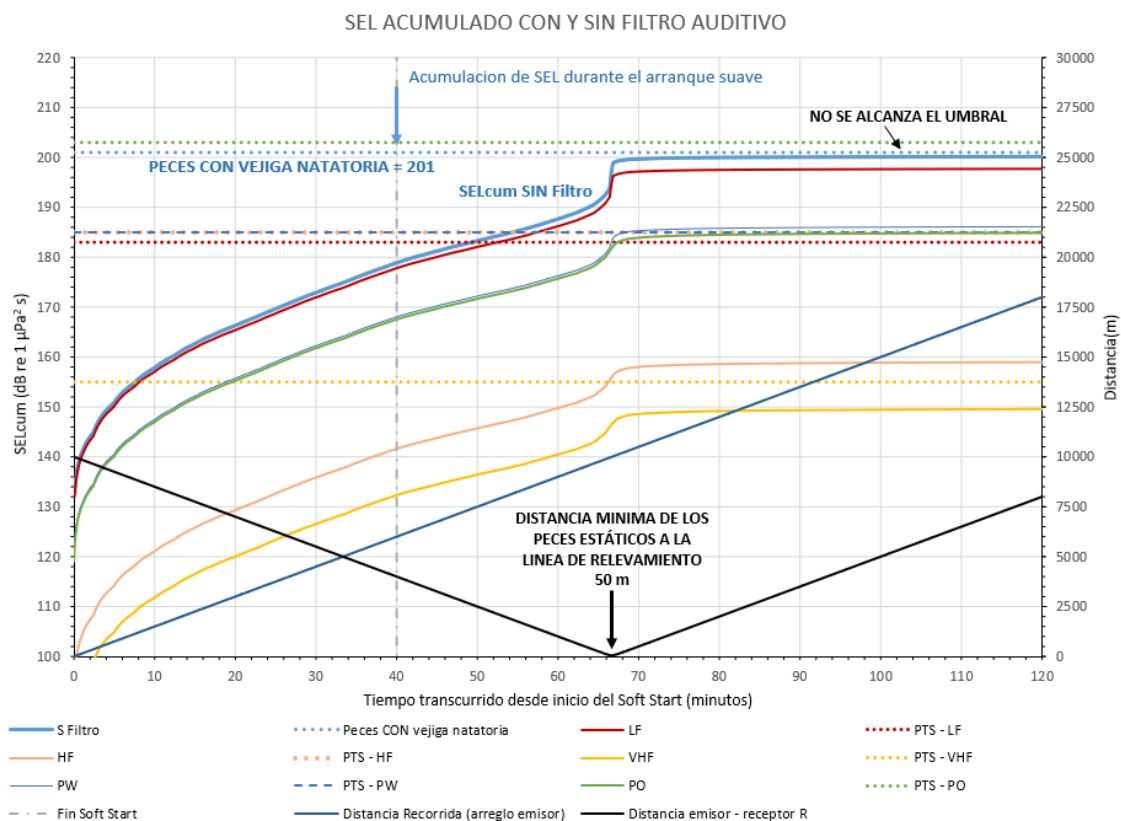


Figura 53. SEL acumulado igual al umbral de mortalidad potencial para peces con vejiga natatoria, considerando que se encuentran ubicados a 50 m de la línea de relevamiento. Ejemplo para Profundidad mínima Uniforme (B0).



8.3 CÁLCULO DEL SEL ACUMULADO METODOLOGIA DE EMISIÓN INTERPOLADA (AZIMUT 0°-45°-90°)

Se presentan a continuación los resultados obtenidos empleando la metodología de Emisión Interpolada entre los Azimut 0°, 45° y 90°, la cual representa más adecuadamente que la metodología de emisión dual la variación angular de la energía sonora emitida por el arreglo.

De la Tabla 21 a la Tabla 23 se presentan los valores de SELcum obtenidos bajo diferentes hipótesis de punto inicial, trayectoria del receptor y duración del aumento gradual de la emisión, para cada una de las profundidades modeladas. En la Figura 54 a la Figura 60 se ilustran algunos de los casos simulados, a modo ilustrativo.

La condición más desfavorable es siempre aquella en la que el receptor está justo en la línea de avance, dado que el SEL acumulado se acerca más al PTS LF que cuando el receptor se halla ubicado transversalmente a ésta. Para las condiciones de profundidad mínima (B0) y variable (BV8) se logra obtener un valor de SELcum inferior al PTS LF considerando que el incremento de la emisión en el procedimiento de aumento gradual es temporalmente equiespaciado para cada combinación, con una duración mínima de 25 minutos y sin adoptar la hipótesis de que la velocidad inicial de escape es igual a 4 m/s. En cambio para la profundidad máxima (BA), al haberse adoptado un ángulo de emisión Dip de 80°, la energía sonora calculada es mayor, y para no superar el PTS LF, teniendo en cuenta una velocidad constante de escape de 1,5 a 2 m/s, resulta necesario considerar que el aumento gradual tiene una duración mínima de 30 minutos y además es más lento, alcanzando la combinación 10 de las 22 en 20 minutos.

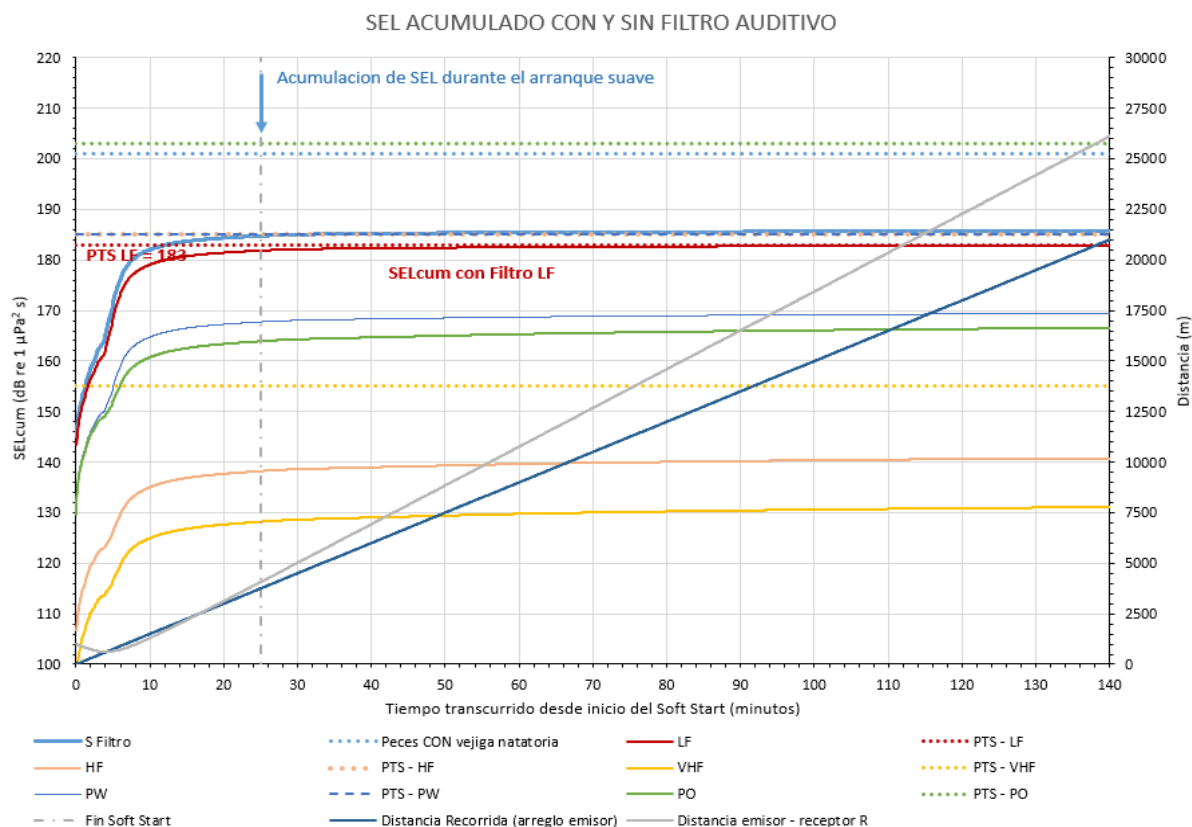


Figura 54. SEL acumulado Emisión Interpolada. Aumento Gradual 25 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1.000 m del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s constante. Azimut movimiento del receptor 90°. Profundidad mínima Uniforme (B0).



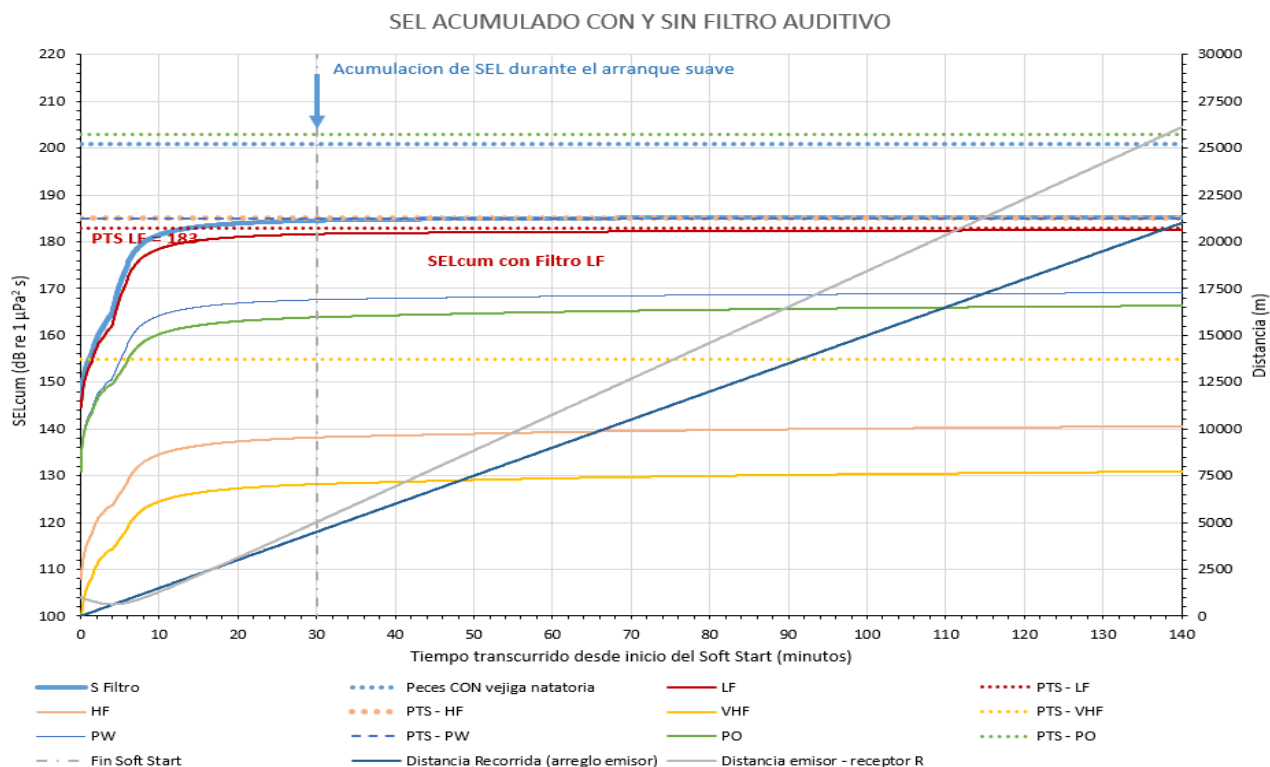


Figura 55. SEL acumulado Emisión Interpolada. Aumento Gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1.000 m del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s constante. Azimut movimiento del receptor 90°. Profundidad mínima Uniforme (B0).

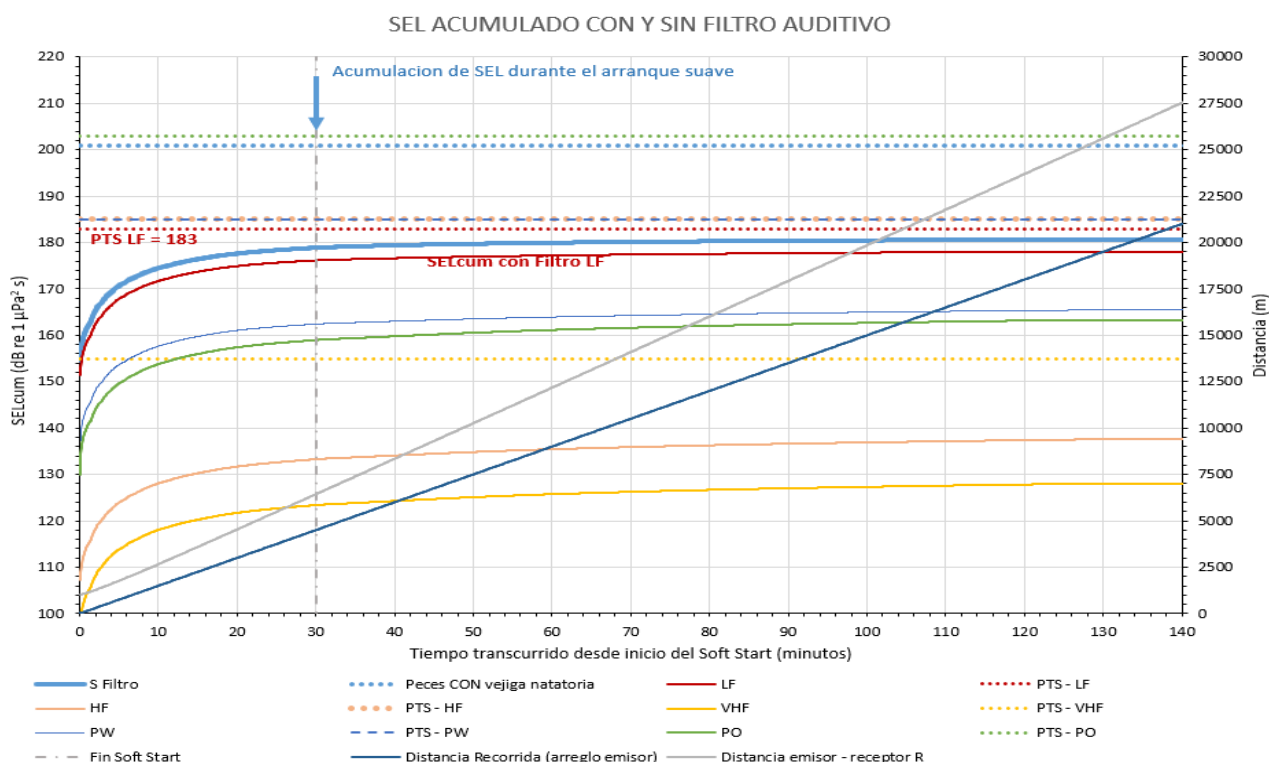


Figura 56. SEL acumulado Emisión Interpolada. Aumento Gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Azimut movimiento del receptor 90°. Velocidad del receptor 2 m/s constante. Profundidad mínima Uniforme (B0).



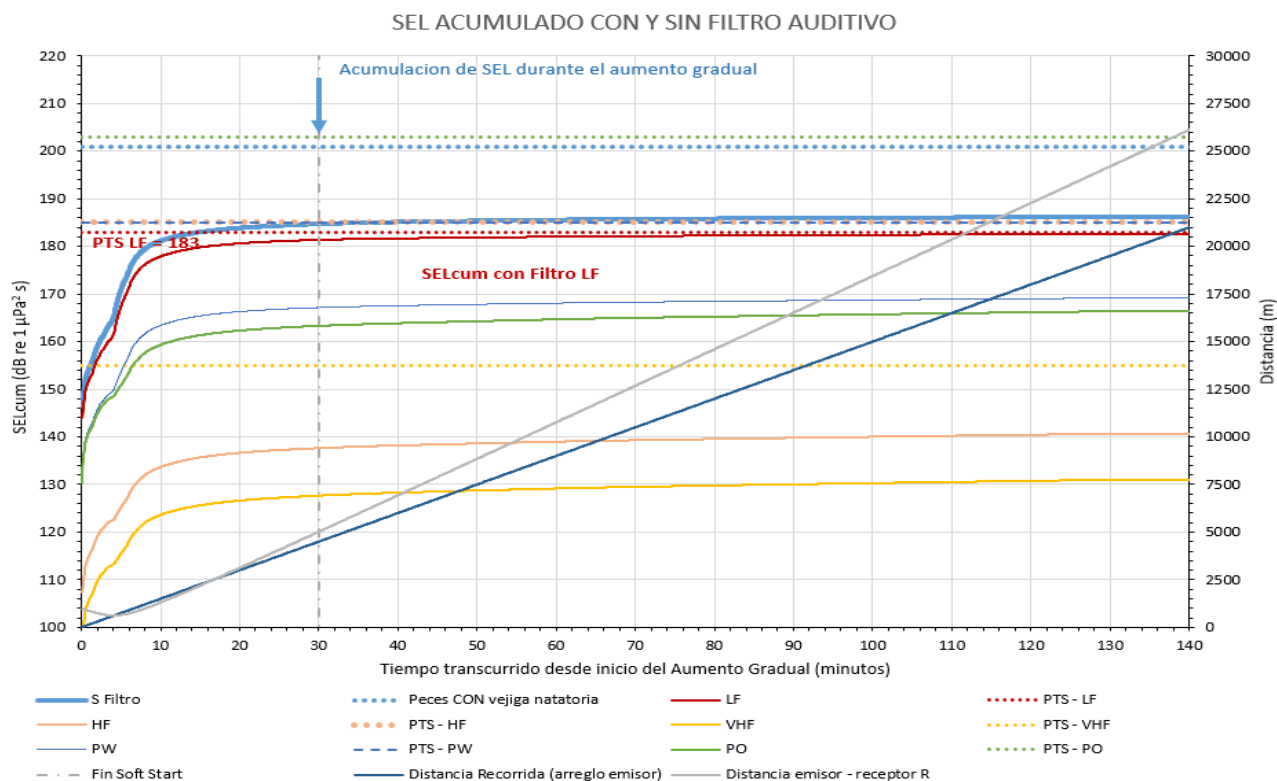


Figura 57. SEL acumulado Emisión Interpolada. Aumento Gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1.000 m del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s constante. Azimut movimiento del receptor 90°. Profundidad variable (BV8).

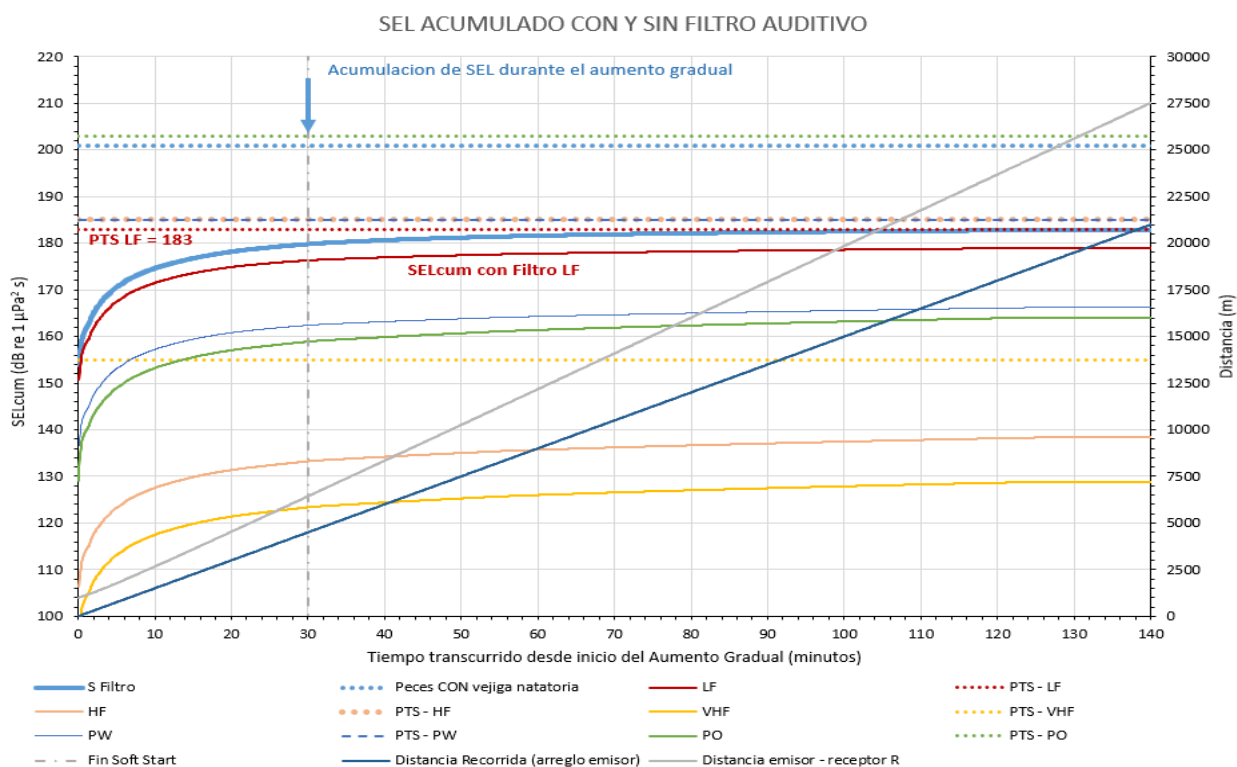


Figura 58. SEL acumulado Emisión Interpolada. Aumento Gradual 30 minutos (25% en 20 minutos). Posición inicial del receptor a 1.000 m del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s. Azimut movimiento del receptor 90°. Profundidad variable (BV8).



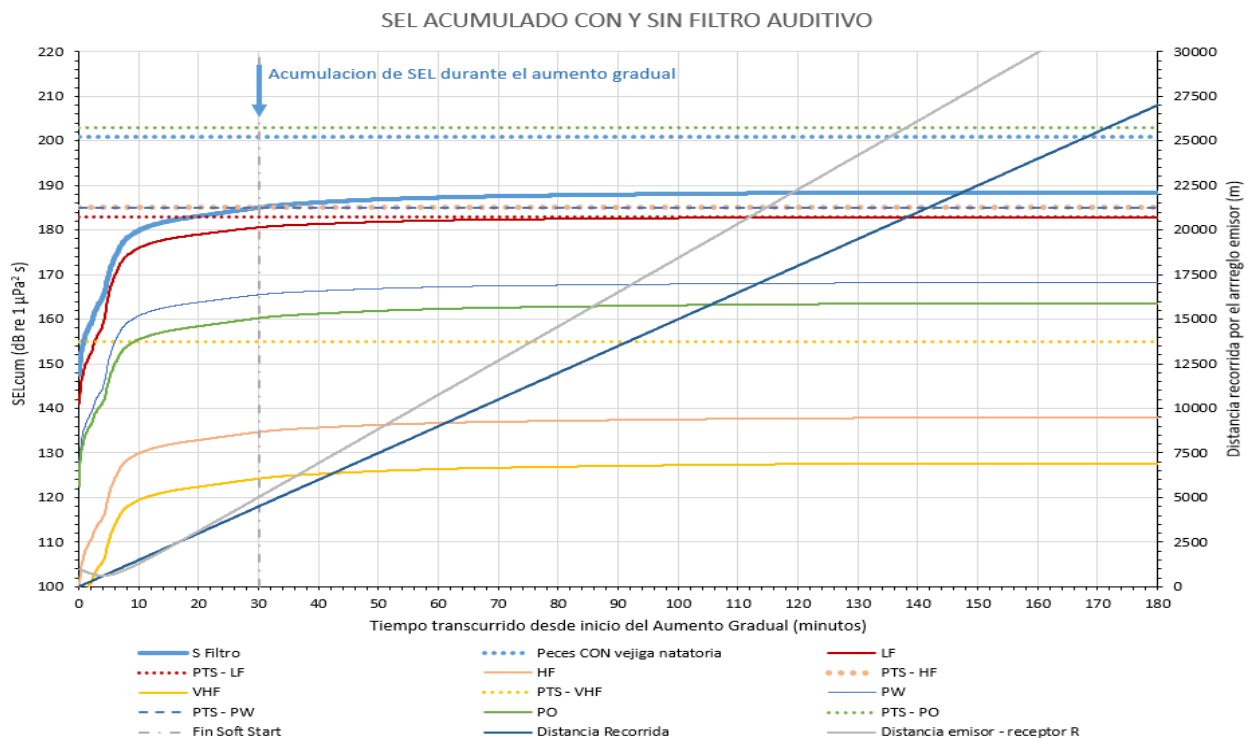


Figura 59. SEL acumulado Emisión Interpolada. Aumento Gradual 30 minutos (25% en 20 minutos). Posición inicial del receptor perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Azimut movimiento del receptor 90°. Velocidad del receptor 2 m/s constante. Profundidad máxima uniforme (BA).

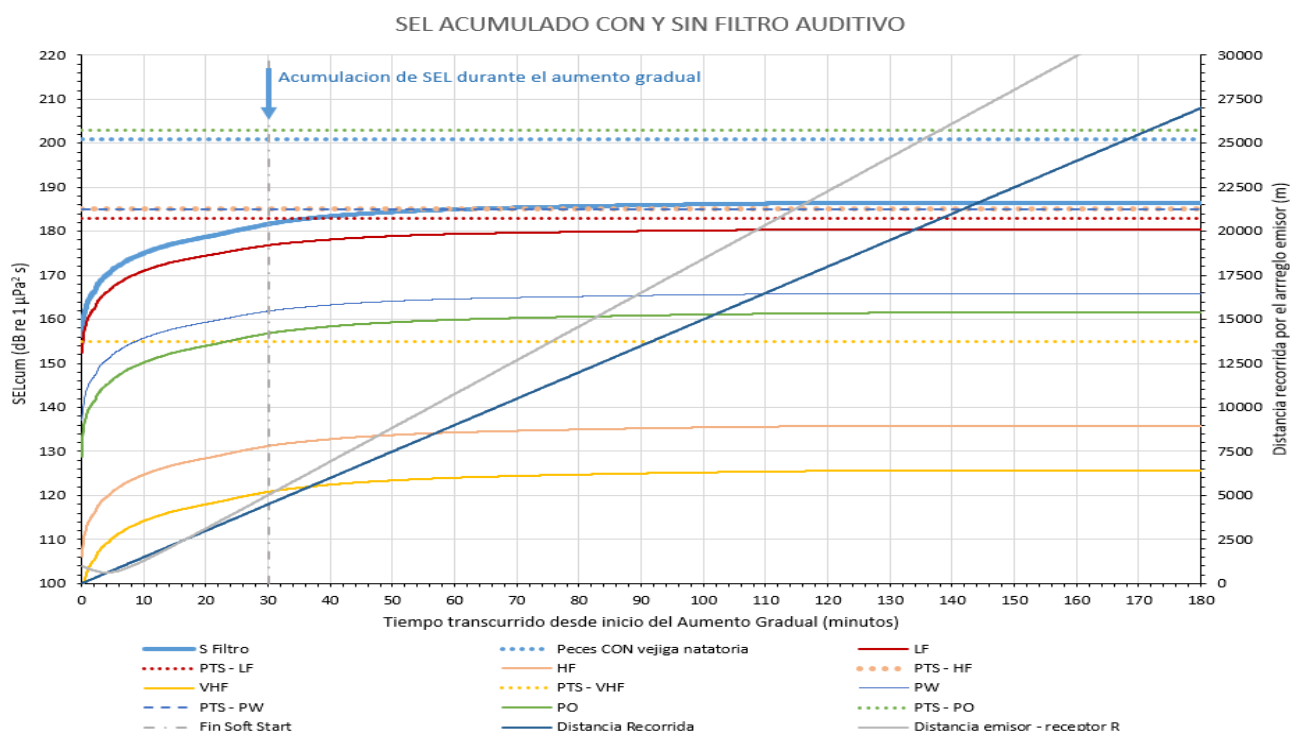


Figura 60. SEL acumulado Emisión Interpolada. Aumento Gradual 30 minutos (25% en 20 minutos). Posición inicial del receptor perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento Gradual. Azimut movimiento del receptor 90°. Velocidad del receptor 2 m/s constante. Profundidad máxima uniforme (BA).



Tabla 21. Valores de SELcum (dB re 1 μPa^2 s) comparados con los umbrales de PTS para mamíferos y límites para peces. Profundidad mínima Uniforme (B0). Metodología de Emisión Interpolada. Procedimientos de aumento gradual equiespaciados.

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Umbrales de comparación	Peces SIN VN	PTS - LF	PTS - HF	PTS - VHF	PTS - PW	PTS - PO
	219	183	185	155	185	203
	Peces CON VN	TTS - LF	TTS - HF	TTS - VHF	TTS - PW	TTS - PO
	201	168	170	140	170	188
Aumento gradual 20 minutos. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	188,1	185,3	142,6	132,8	171,5	168,3
Diferencia PTS	-12,9	2,3	-42,4	-22,2	-13,5	-34,7
Aumento gradual 25 minutos. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	186,6	183,7	141,4	131,7	170,2	167,1
Diferencia PTS	-14,4	0,7	-43,6	-23,3	-14,8	-35,9
Aumento gradual 30 minutos. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	185,3	182,5	140,5	130,8	169,1	166,3
Diferencia PTS	-15,7	-0,5	-44,5	-24,2	-15,9	-36,7
Aumento gradual 40 minutos. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	183,4	180,6	139,3	129,6	167,5	165,0
Diferencia PTS	-17,6	-2,4	-45,7	-25,4	-17,5	-38,0
Aumento gradual 25 minutos. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento gradual. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	180,7	178,1	137,5	128,0	165,4	163,3
Diferencia PTS	-20,3	-4,9	-47,5	-27,0	-19,6	-39,7
Aumento gradual 30 minutos. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Verificación velocidad del receptor 1,7 m/s						
SELcum	185,6	182,9	142,4	132,9	170,2	168,3
Diferencia PTS	-15,4	-0,1	-42,6	-22,1	-14,8	-34,7
Aumento gradual 30 minutos. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento gradual. Verificación velocidad del receptor 1,7 m/s						
SELcum	181,0	178,7	140,0	130,6	167,1	165,8
Diferencia PTS	-20,0	-4,3	-45,0	-24,4	-17,9	-37,2

Tabla 22. Valores de SELcum (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{ s}$) comparados con los umbrales de PTS para mamíferos y límites para peces. Profundidad variable (BV8). Metodología de Emisión Interpolada. Procedimientos de aumento gradual equiespaciados.

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Umbrales de comparación	Peces SIN VN	PTS - LF	PTS - HF	PTS - VHF	PTS - PW	PTS - PO
	219	183	185	155	185	203
	Peces CON VN	TTS - LF	TTS - HF	TTS - VHF	TTS - PW	TTS - PO
	201	168	170	140	170	188
Aumento gradual 20 minutos. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	188,6	185,2	142,5	132,7	171,4	168,2
Diferencia PTS	-12,4	2,2	-42,5	-22,3	-13,6	-34,8
Aumento gradual 25 minutos. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	187,3	183,8	141,5	131,8	170,2	167,2
Diferencia PTS	-13,7	0,8	-43,5	-23,2	-14,8	-35,8
Aumento gradual 30 minutos. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	186,2	182,6	140,7	131,1	169,2	166,5
Diferencia PTS	-14,8	-0,4	-44,3	-23,9	-15,8	-36,5
Aumento gradual 40 minutos. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	184,6	181,0	139,6	130,1	167,8	165,4
Diferencia PTS	-16,4	-2,0	-45,4	-24,9	-17,2	-37,6
Aumento gradual 30 minutos. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento gradual. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	182,8	179,0	138,4	128,8	166,2	164,1
Diferencia PTS	-18,2	-4,0	-46,6	-26,2	-18,8	-38,9
Aumento gradual 30 minutos. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Verificación velocidad del receptor 1,7 m/s						
SELcum	186,4	182,9	142,5	133,0	170,3	168,3
Diferencia PTS	-14,6	-0,1	-42,5	-22,0	-14,7	-34,7
Aumento gradual 30 minutos. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento gradual. Verificación velocidad del receptor 1,0 m/s						
SELcum	184,7	182,0	144,7	135,4	171,4	170,6
Diferencia PTS	-16,3	-1,0	-40,3	-19,6	-13,6	-32,4



Tabla 23. Valores de SELcum (dB re 1 μPa^2 s) comparados con los umbrales de PTS para mamíferos y límites para peces. Profundidad máxima uniforme (BA). Metodología de Emisión Interpolada.

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Umbrales de comparación	Peces SIN VN	PTS - LF	PTS - HF	PTS - VHF	PTS - PW	PTS - PO
	219	183	185	155	185	203
	Peces CON VN	TTS - LF	TTS - HF	TTS - VHF	TTS - PW	TTS - PO
	201	168	170	140	170	188
Aumento gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s.						
SELcum	190,0	184,9	139,5	129,2	170,0	165,1
Diferencia PTS	-11,0	1,9	-45,5	-25,8	-15,0	-37,9
Aumento gradual 35 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s.						
SELcum	189,2	184,0	138,7	128,4	169,1	164,3
Diferencia PTS	-11,8	1,0	-46,3	-26,6	-15,9	-38,7
Aumento gradual 40 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s.						
SELcum	188,6	183,2	138,0	127,7	168,4	163,6
Diferencia PTS	-12,4	0,2	-47,0	-27,3	-16,6	-39,4
Aumento gradual 25 minutos (Combinación 10 en 15 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s.						
SELcum	189,8	184,6	139,2	128,9	169,7	164,8
Diferencia PTS	-11,2	1,6	-45,8	-26,1	-15,3	-38,2
Aumento gradual 30 minutos (Combinación 10 en 20 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s.						
SELcum	188,5	182,9	137,9	127,6	168,1	163,5
Diferencia PTS	-12,5	-0,1	-47,1	-27,4	-16,9	-39,5
Aumento gradual 35 minutos (Combinación 10 en 25 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Velocidad del receptor 2 m/s.						
SELcum	187,5	181,7	136,9	126,7	167,0	162,5
Diferencia PTS	-13,5	-1,3	-48,1	-28,3	-18,0	-40,5
Aumento gradual 30 minutos equiespaciado. Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento gradual. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	187,5	181,8	136,9	126,7	167,1	162,5
Diferencia PTS	-13,5	-1,2	-48,1	-28,3	-17,9	-40,5
Aumento gradual 30 minutos (Combinación 10 en 20 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento gradual. Velocidad del receptor 2 m/s						
SELcum	186,5	180,5	135,8	125,6	165,9	161,5
Diferencia PTS	-14,5	-2,5	-49,2	-29,4	-19,1	-41,5
Aumento gradual 30 minutos (Combinación 10 en 20 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor en la línea de avance. Verificación velocidad del receptor 1,5 m/s						
SELcum	188,8	182,9	138,9	128,9	168,6	164,7
Diferencia PTS	-12,2	-0,1	-46,1	-26,1	-16,4	-38,3
Aumento gradual 30 minutos (Combinación 10 en 20 minutos). Posición inicial del receptor a 1 km del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Aumento gradual. Verificación velocidad del receptor 1,5 m/s						
SELcum	187,0	180,7	137,1	127,1	166,5	162,8
Diferencia PTS	-14,0	-2,3	-47,9	-27,9	-18,5	-40,2



9 CONCLUSIONES

A lo largo del proceso de cálculo de las distancias de exclusión a ser respetadas previo al inicio del arranque suave se ha desarrollado una intensa y detallada evaluación de las condiciones de emisión y recepción del sonido en el área de estudio.

En primer lugar se ha efectuado un análisis de sensibilidad de las pérdidas por transmisión en varios puntos del área de estudio, elegidos a fin de representar diferentes profundidades y corrientes marinas.

Los parámetros que influyen en la transmisión del sonido en el agua (densidad y celeridad) fueron seleccionados considerando los perfiles verticales de salinidad y temperatura del agua en estos puntos para diferentes estaciones del año (ver Anexo I), y se seleccionó la época más conservativa (menores Pérdidas por Transmisión). Se ha verificado que no se modifican significativamente las Pérdidas por Transmisión según las características de los perfiles oceanográficos empleados (velocidad del sonido y densidad del agua), habiéndose seleccionado la condición globalmente más conservativa, correspondiente a la estación Primavera, la cual cubre permite tener una amplia flexibilidad en cuanto a los meses de realización de los relevamientos.

En cuanto a la propagación y reflexión del sonido en el lecho marino, los puntos analizados comprenden diversas combinaciones de suelos en la capa superficial y en la capa subyacente. El análisis de sensibilidad (que se presenta en el Anexo II) se realizó empleando 5 frecuencias indicativas, separadas en octavas, a los efectos de barrer el rango de mayores emisiones del espectro del arreglo.

Adicionalmente, se evaluó la influencia de la variación de las profundidades del lecho en la transmisión del sonido, analizando perfiles o transectas batimétricas cercanas a la costa para las cuales el gradiente de profundidad es significativo. Se concluyó que uno de estos perfiles (el número 8) podría ser más conservativos que las obtenidas para otros puntos en las modelizaciones con profundidad constante, por lo que se mantuvo su análisis en todo el proceso.

A partir de este análisis se seleccionaron dos puntos de profundidad constante como los más conservativos, uno en bajas profundidades y otro en la zona más profunda, además del perfil de profundidad variable. Se realizaron además análisis de sensibilidad adicionales variando los parámetros que describen las características de transmisión del sonido en el lecho y los espesores de las capas de suelos, seleccionando a su vez aquellas combinaciones que resultaron más conservativas.

Se calcularon las pérdidas de transmisión mínimas en toda la columna de agua y para cada distancia al arreglo en pasos de un metro en ambas direcciones, para frecuencias por tercios de octava desde la frecuencia de corte para la cual el sonido no se transmite en estas profundidades, y se aplicaron a los espectros de emisión del arreglo que se empleará, considerando diferentes ángulos de emisión con respecto a la dirección de avance de éste (0°, 45° y 90°) y diferentes ángulos respecto a la vertical, a fin de obtener los máximos valores posibles de los indicadores SPL_{peak} y SEL que podrían alcanzar a los animales receptores.

Este proceso permite aplicar los criterios de métrica dual propuestos por Southall (2019) para obtener las distancias en que se superarían los valores de SPL_{peak} sin filtrar y de SEL acumulado correspondientes a los umbrales de afectación (PTS). En cuanto al SEL, se siguieron los procedimientos de filtrado por frecuencia correspondientes a los audiogramas de las diferentes especies de mamíferos marinos, mientras que se consideró el valor sin filtrar para evaluar la afectación de los peces.



Las distancias de exclusión de mamíferos marinos para iniciar el procedimiento de aumento gradual obtenidas mediante el empleo del criterio de métrica dual propuesto por Southall (2019) resultan de 800 metros. La distancia obtenida es superior a los 500 metros que son un estándar habitual empleado en la industria conforme a las recomendaciones usuales (JNCC, 2017), pero inferior a los 1.000 m requeridos por la normativa de aplicación nacional.

Esta distancia surge del criterio de SPL_{peak} sin filtrar, siendo limitante el valor de PTS – VHF (grupo de cetáceos de frecuencias auditivas muy altas).

Cabe destacar que el valor obtenido ha sido alcanzado seleccionando las condiciones de profundidad y características del medio más conservativas en cuanto a las Pérdidas por Transmisión del sonido.

El criterio de SEL_{cum} se aplicó para verificar si la distancia de exclusión antes obtenida resulta suficiente para evitar la superación de los umbrales de PTS para alguno de los grupos auditivos. A los efectos de cumplir con la normativa nacional, la distancia inicial de exclusión al inicio del arranque suave que se adoptó es de 1.000 metros.

Considerando el cumplimiento de los procedimientos de aumento gradual la situación más restrictiva en cuanto al PTS para el SEL acumulado se produce para los Cetáceos de frecuencias bajas (LF). Este grupo comprende todos los cetáceos del orden Mysticeti (en particular las ballenas).

Cabe destacar que para todas las demás especies de Cetáceos de frecuencias auditivas altas HF y muy altas VHF así como para todos los Pinnípedos (PW y PO) la acumulación de SEL se encuentra entre unos 10 y 45 dB por debajo de los umbrales de PTS, e incluso por debajo del TTS, por lo que no se prevé que sean afectados significativamente por la prospección.

Se analizó el efecto de variar la duración del procedimiento de Aumento Gradual de la emisión entre el valor mínimo de 20 minutos y el máximo de 40 minutos, verificándose que a medida que se incrementa esta duración la acumulación de SEL_{cum} es inferior.

El análisis del SEL_{cum} se realizó aplicando dos procedimientos diferentes, uno de los cuales, denominado de Emisión Dual, sólo considera los espectros de emisión para Azimut 0° (en el sentido de avance del arreglo) y 90° (perpendicular al mismo) que es mucho más intenso, mientras que el procedimiento de Emisión Interpolada incluye el espectro de emisión para Azimut 45° (transversal al avance), el cual posee menor intensidad que los otros dos.

En todos los casos, la hipótesis de trayectoria del receptor que resulta más exigente es aquella en la que éste se encuentra a 1.000 m del arreglo en el momento de inicio del aumento gradual, exactamente en la línea de avance del arreglo, por lo cual la fuente de emisión se va aproximando al animal receptor a medida que pasa el tiempo, de modo que durante el escape la distancia emisor – receptor se incrementa más lentamente que en otras hipótesis. Las demás posibilidades de posición inicial del receptor en las cuales éste tiende a escapar alejándose del arreglo resultan mucho menos restrictivas, y en particular si el mismo se encuentra ubicado inicialmente a 1.000 m pero en una posición perpendicular a la trayectoria del arreglo, no se generan condicionamientos en relación con la forma en que se debe realizar el aumento gradual de la emisión.



Del procedimiento de Emisión Dual, que es el más conservativo, surge que sería necesario que la duración del aumento gradual sea de al menos 35 minutos, pero alcanzando a los 25 minutos sólo la combinación 11 de las 22 combinaciones de fuentes que conforman el proceso (con un volumen de 540 cu.in. - 8,85 litros), y si el receptor se encuentra en la línea de avance del arreglo, debería tener una velocidad de escape inicial de 4 m/s durante 30 minutos, la cual si bien conforme a la bibliografía se considera factible para un animal de tipo auditivo LF como una ballena, resulta relativamente elevada.

La aplicación del procedimiento de Emisión Interpolada, que se considera más realista puesto que tiene en cuenta más adecuadamente la variabilidad de la energía emitida según el azimut entre el arreglo y el receptor, permite obtener resultados con un SELcum inferior al PTS LF, considerando una duración del procedimiento de aumento gradual de 30 minutos, y sin exceder los 2 m/s de velocidad de escape del receptor. Se ajustó la progresión inicial de la emisión de las combinaciones de fuentes, alcanzando la combinación 10 con un volumen de 480 cu.in. (7,87 litros) a los 20 minutos, lo cual si bien es una adecuación del procedimiento que sólo sería necesario cuando el receptor está a 1.000 m en la dirección de avance del arreglo, sería empleado preferentemente en todos los procesos de aumento gradual.

A partir de los estudios realizados y en relación con los mamíferos marinos se puede concluir que:

- La distancia de exclusión de 1.000 m requerida por las regulaciones nacionales aplicables es suficiente como parte de las medidas de mitigación.
- La duración mínima del procedimiento de aumento gradual de la emisión es de 30 minutos según la metodología de cálculo del SELcum que se considera más realista, con el condicionamiento de que la combinación 10º de fuentes se debe activar recién a los 20 minutos de iniciado el proceso.

En relación con la métrica del SELcum, los peces con vejiga natatoria pueden encontrarse a 50 m del arreglo cuando comienza el aumento gradual, y si quedaran estáticos en ese lugar a medida que el buque se aleja, no se superaría el umbral de mortalidad potencial 201 dB re 1 μPa^2 s. Si estuviesen justo cerca de una línea de prospección y no se movieran cuando pasa el arreglo emitiendo a máxima potencia (lo cual es poco probable que ocurra pues se han documentado comportamientos evasivos), tampoco se superaría el umbral de mortalidad potencial si la distancia al arreglo fuese igual a 50 m. Esto es válido también para los peces sin vejiga natatoria cuyo umbral de mortalidad potencial para SELcum es mayor (219 dB re 1 μPa^2 s). Se recuerda que mediante modelación se analizaron distancias a partir de los 50 m desde el arreglo, puesto que muy cerca del arreglo los valores del SEL y del SPL son inferiores a los estimados a partir del campo lejano, y el cálculo de la propagación de algunas frecuencias es poco preciso.

Si bien no se requiere ni es factible la implementación de medidas de mitigación adicionales con respecto a los peces, se puede apreciar que solamente serían afectados aquellos que se encuentren en un entorno muy cercano al arreglo, del cual probablemente se alejen tanto durante el procedimiento de aumento gradual, como durante la prospección de cada línea si el arreglo se acercara a la ubicación de estos.

En conclusión, la posibilidad de que el proyecto produzca lesiones mortales o potencialmente mortales en los peces es poco probable y en caso de ocurrir sería muy limitada y localizada.

10 BIBLIOGRAFÍA

Atlas de sensibilidad ambiental de la costa y el mar argentino (2008) en Boltovskoy, D. (ed.). [En línea] buenos aires, disponible en: <http://atlas.ambiente.gov.ar/>.

Caldwell, J. and W. Dragoset (2000). A brief overview of seismic air-gun arrays. The Leading Edge 2000.

Gordon Jonathan C.D., Douglas Gillespie, John Potter, Alexandros Frantzis, Mark P. Simmonds and Rene Swift (2003). "The Effects of Seismic Surveys on Marine Mammals",.

Instituto Brasileiro de Medio Ambiente y Recursos Naturales Renovables. IBAMA. (2018). Guía para el Monitoreo de la Fauna Marina en los Estudios Sísmicos Marinos. Ministerio de Medio Ambiente del Brasil.

IOC, SCOR y IAPSO (2010). The International Thermodynamic Equation of Seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56, UNESCO (English), 196 pp. http://www.teos-10.org/pubs/TEOS-10_Manual.pdf

International Association of Oil&Gas Producers (IOGP). International Association of Geophysical Contractors (IAGC). 2017. Recommended monitoring and mitigation measures for cetaceans during marine seismic survey geophysical operations. Report 579. <https://www.iagc.org/uploads/4/5/0/7/45074397/579.pdf>

Jensen F., Kuperman W., Porter M., and Schmidt H. (1994). Computational Ocean Acoustics. AIP Series in Modern Acoustics and Signal Processing, New York.

Jensen F., Kuperman W., Porter M., and Schmidt H. (2011). Computational Ocean Acoustics. 2nd Edition. Springer Science & Business Media

Joint Nature Conservation Committee. August (2017). JNCC guidelines for minimising the risk of injury to marine mammals from geophysical surveys. <https://data.jncc.gov.uk/data/e2a46de5-43d4-43f0-b296-c62134397ce4/jncc-guidelines-seismicsurvey-aug2017-web.pdf>

Kuperman W.A. and Roux P. (2007). Underwater acoustics. Marine Physical laboratory, Scripps Institution of Oceanography. University of California, San Diego. Springer Handbook of Acoustics, ISBN 978-0-387-30446-5. Springer-Verlag New York, 2007, p. 149. DOI: 10.1007/978-0-387-30425-0_5. https://www.researchgate.net/publication/234472513_Underwater_Acoustics/download

Lawson, J.W., Malme C.I., Richardson W.J. (2001). Assesment of Noise Issues relevant to Marine Mammals Near the Bp Clair Development. Rep. By Lgl Ltd., Environ. Res. Assoc. King City, Ont. Canada, and Eng. and Sci. Services, Hingham, Ma, U.S.A., For Aurora Environmental Ltd., Stromness Orkney. Lgl Rep. Ta2565-1.

Leroy C. (2008) A new equation for the accurate calculation of sound speed in all oceans. The Journal of the Acoustical Society of America 124, 2774



McCauley R., Fewtrell J., Duncan A., Jenner C., Jenner M., Penrose J., Prince R., Adhitya A., Murdoch J., McCabe K. (2000). Marine seismic surveys: analysis and propagation of air-gun signals; and effects of air-gun exposure on humpback whales, sea turtles, fishes and squid. Centre for Marine Science and Technology, Project Cmst 163, Report R99-15, Curtin University of Technology. Western Australia.

McDougall, T. J. y P. M. Barker (mayo 2011 - última actualización julio 2017 - versión 3.06.3). Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Tool - v3.06.3). http://www.teos-10.org/pubs/Getting_Started.pdf

McDougall, T. J. (s/f). The International Thermodynamic Equation of Seawater – 2010, Introductory lecture slides. University of New South Wales, Ocean Physics, School of Mathematics and Statistics. Disponible en www.TEOS-10.org

National Marine Fisheries Service (2016). Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing: Underwater Acoustic Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. U.S. Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-55, 178 p.

National Marine Fisheries Service (2018) 2018 Revisions to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0): Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. U.S. Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59, 167 p

Nedwell J R, Needham K, Turnpenny A W H, Thompson D (1999) "Measurement of Sound During a 3D Seismic Survey in Blocks 14/14a of the North Sea". Subacoustech Report Reference: 356r0108, February 1999.

Orúe-Echevarría, D.; Pelegrí, J.L.; Alonso-González, I.J.; Benítez-Barrios, V.M.; De La Fuente, P.; Emelianov, M.; Gasser, M.; Herrero, C.; Isern-Fontanet, J.; Peña-Izquierdo, J.; Ramírez-Garrido, S.; Rosell-Fieschi, M.; Salvador, J.; Saraceno, M.; Valla, D.; Vidal, M. (2019). "Dataset on the TIC-MOC cruise onboard the R/V Hespérides, March 2015, Brazil-Malvinas Confluence". Data in Brief. 22:185-194.

Pawlowicz, R. (octubre 2010, última actualización abril 2013 - v8). What every oceanographer needs to know about TEOS-10 (The TEOS-10 Primer) - v8. http://www.teos-10.org/pubs/TEOS-10_Primer.pdf

Piola, A. y R. P. Matano (2017). Brazil and Falklands (Malvinas) Currents. En: Ocean Currents: Atlantic Western Boundary - Brazil Current / Falkland (Malvinas) Current, pp 340-349.

Popper, A., Hawkins, A., Fay, R., Mann, D., Bartol, S., Carlson, T., Coombs, S., Ellison, W., Gentry, R., Halvorsen, M., Løkkeborg, S., Rogers, P., Southall, B., Zeddies, D., y Tavalga, W. (2014). Sound exposure guidelines for fishes and sea turtles: A technical report prepared by ansi-accredited standards committee s3/sc1 and registered with ANSI. 978-3-319-06658-5. springer international publishing.

Porter M.B. and Bucker H.P. (1987) Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic Fields. J. Acoust. Soc. America, 82(4):1349-1359.



Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene, Jr., C. R., , Kastak, D., et al. 2007. Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals*, 33: 411–521.

Southall B.L., Finneran J. J., Reichmuth C., Nachtigall P. E., Ketten D. R., Bowles A. E., Ellison W. T., Nowacek D. P. and Tyack P. K.. (2019). Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations For Residual Hearing Effects. *Aquatic Mammals* .45(2):125-232, Doi:10.1578/Am.45.2.2019.125

Tougaard, J. (2016). Input to revision of guidelines regarding underwater noise from oil and gas activities - effects on marine mammals and mitigation measures. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 52 pp. Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 202. <http://dce2.au.dk/pub/SR202.pdf>

Violante R., Costa I., Cavallotto J., Paterlini C., Marcolini S. y Bozzano G. (2014). Rasgos morfosedimentarios, procesos y evolución de la plataforma continental argentina desde el último máximo glacial. Servicio de Hidrografía Naval, Departamento Oceanografía, División Geología y Geofísica Marina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71 (2): 292 – 310

Urick, Robert J. (1983). *Principles of Underwater Sound*, Third Edition. McGraw-Hill Book Company, p. 111.

Ward, P.D. (2015) SWAP 3D Seismic Survey - Underwater Sound Study. Award Environmental Consultants Ltd. Southampton SO16 6AA

Wang, L., Heaney, K., Pangerc, T., Theobald, P., Robinson, S., and Ainslie, M. (2014). Review of underwater acoustic propagation models. National Physical Laboratory, Teddington, UK

