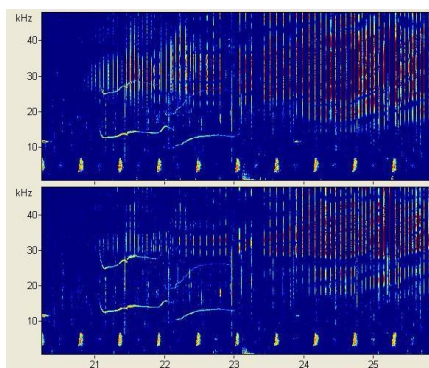




MANUAL DE TÉCNICO DE ACÚSTICA PASIVA PARA OPERACIONES OFF-SHORE GENERADORAS DE RUIDO EN AGUAS ESPAÑOLAS



1era edición – Marzo 2014



MANUAL DEL TÉCNICO DE ACÚSTICA PASIVA PARA OPERACIONES OFF-SHORE GENERADORAS DE RUIDO EN AGUAS ESPAÑOLAS

Título: Manual del Técnico de Acústica Pasiva para operaciones Off-shore generadoras de ruido en aguas españolas

Autores: Carla A. Chicote¹ y Manuel Castellote²

Entidades: ¹SUBMON® y ²National Marine Mammal Laboratory AFSC/NOAA

Año: 2013 (1ª edición)

Financiación: Fundación Biodiversidad y SUBMON

Este manual tiene que ser citado como: Chicote, C.A; Castellote M. (2013) Manual del Técnico de Acústica Pasiva para operaciones Off-shore generadoras de ruido en aguas españolas. Fundación Biodiversidad y SUBMON®

Imagen de portada: © SUBMON®

Datos de contacto: SUBMON® - Rabassa, 49-51 08024 Barcelona

Teléfono: 932135849 info@submon.org -
www.submon.org



1.	INTRODUCCIÓN A LA ACÚSTICA SUBMARINA.....	5
1.1	¿Qué es el sonido?	5
1.2	El Decibelio.....	7
1.2.1	Raíz Cuadrática Media (RMS)	9
1.2.2	Nivel de Exposición Sonora (Sound Exposure Level, SEL)	10
1.2.3	Nivel de pico	10
1.3	Ondas sísmicas	11
1.4	Propagación del sonido	12
1.4.1	Pérdida por transmisión	13
1.4.1.1	Pérdida por absorción	13
1.4.1.2	Pérdida por divergencia	14
1.4.2	El canal de sonido profundo-SOFAR.....	15
1.4.3	Ecuación de SONAR.....	16
1.5	Las octavas y los tercios de octava.....	18
2.	LOS MAMÍFEROS MARINOS Y EL SONIDO	18
2.1	Sonidos Tonales.....	19
2.1.1	Silbidos (Whistles)	20
2.1.2	Armónicos	22
2.2	Sonidos pulsados.....	23
2.2.1	Clicks de ecolocalización	24
2.2.2	Zumbidos (Burst pulsed sounds)	24
3.	RUIDO AMBIENTE.....	26
4.	EQUIPO BÁSICO DEL PAM	28
4.1	Componentes del equipo de seguimiento acústico pasivo (PAM).....	30
4.1.1	Sección de recepción o matriz del hidrófono.....	30
4.1.2	Sensor de profundidad.....	31



4.1.3	Pesos.....	31
4.1.4	Cable de arrastre	32
4.1.5	Cable de cubierta	32
4.1.6	Unidad de procesado de señal	32
4.1.7	Tarjetas de adquisición.....	33
4.1.8	Filtros de banda.....	34
4.1.9	Auriculares.....	34
4.1.10	Ordenadores.....	34
4.2	Despliegue del equipo PAM	35
4.2.1	Despliegue desde el barco de apoyo (chase vessel)	35
4.2.2	Despliegue desde la embarcación de trabajo sísmico	36
5.	PRINCIPIOS BÁSICOS DEL SOFTWARE DE SEGUIMIENTO ACÚSTICO	37
5.1	El software PAMGUARD	38
5.1.1	Los principios básicos del software PAM	38
5.1.2	Software PAMGUARD	40
5.1.3	Instalar y abrir PAMGUARD.....	41
5.1.4	Ejercicio de configuración de un proyecto PAMGUARD	44
5.1.4.1	Air gun display	44
5.1.4.2	Configuración del GPS	45
5.1.4.3	Añadir módulos	46
5.1.4.4	El Interface del programa.....	48
5.1.4.5	Reproducir archivos de muestra en el software de PAMGUARD.....	49
5.1.4.6	Configuración del PAMGUARD para un proyecto	49
6.	BIBLIOGRAFIA	52
7.	ENLACES DE INTERÉS.....	52



1. INTRODUCCIÓN A LA ACÚSTICA SUBMARINA

1.1 ¿Qué es el sonido?

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

La acústica submarina u Oceanografía acústica es el uso activo o pasivo de sonido para estudiar los parámetros y procesos físicos, así como las especies biológicas y comportamientos, en el mar.

Existen algunos conceptos básicos y unidades de medida que debemos conocer antes de entender cómo funciona la acústica submarina.

Presión: fuerza aplicada por unidad de área.

$$P=F/A$$

Unidades= Newton(N)/metro²=Pascales (Pa)

Energía, se define en física como la capacidad de producir un trabajo.

$$E= F*d$$

Unidades = Newton * metro = Julio (J)

Potencia: flujo de energía, es decir, energía por segundo

$$W= E*t$$

Unidades = Julio*segundo= Watio (W)

Intensidad: flujo de energía (es decir, potencia) por unidad de área

$$I=W/A$$

Unidades=Watio/metro²

Frecuencia: magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.

$$f=1/T$$

Unidades: Hertzios (Hz)

Para calcular la frecuencia de un suceso, se contabilizan un número de ocurrencias cíclicas de este suceso, teniendo en cuenta un intervalo temporal, luego estas repeticiones se dividen por el tiempo transcurrido. Según el Sistema Internacional (SI), la frecuencia se mide en hercios (Hz), en honor a Heinrich Rudolf Hertz. Un hercio es la frecuencia de un suceso o fenómeno

repetido una vez por segundo y es sinónimo de ciclo. Así, un fenómeno con una frecuencia de dos hercios se repite dos veces por segundo.

$$1\text{Hz}=1/\text{s}$$

Un método alternativo para calcular la frecuencia es medir el tiempo entre dos repeticiones (periodo) y luego calcular la frecuencia (f) recíproca de esta manera:

$$f=1/T$$

donde T es el periodo de la señal.

La frecuencia f es igual a la velocidad c de la onda, dividido por la longitud de onda λ (lambda). La velocidad c dependerá de la velocidad del sonido en el medio en el que se propaga la onda (Figura 1.1). La frecuencia tiene una relación inversa con el concepto de longitud de onda, a mayor frecuencia menor longitud de onda y viceversa (Figura 1.2).

$$f= c/\lambda \quad \longrightarrow \quad \lambda= c/f$$

Los humanos describimos los sonidos como graves o agudos según sean de frecuencias bajas o altas, respectivamente. El máximo rango humano de audición se encuentra entre las frecuencias de 20 Hz y 20 kHz (kiloHertzios) aunque en general estos límites se encuentran entre 40 Hz y 16 kHz.

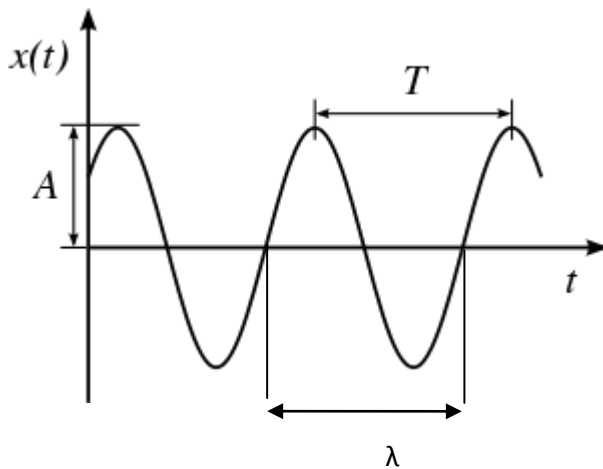


Figura 1.1: Representación de una onda acústica; A) Amplitud, T) Periodo, λ =longitud de onda

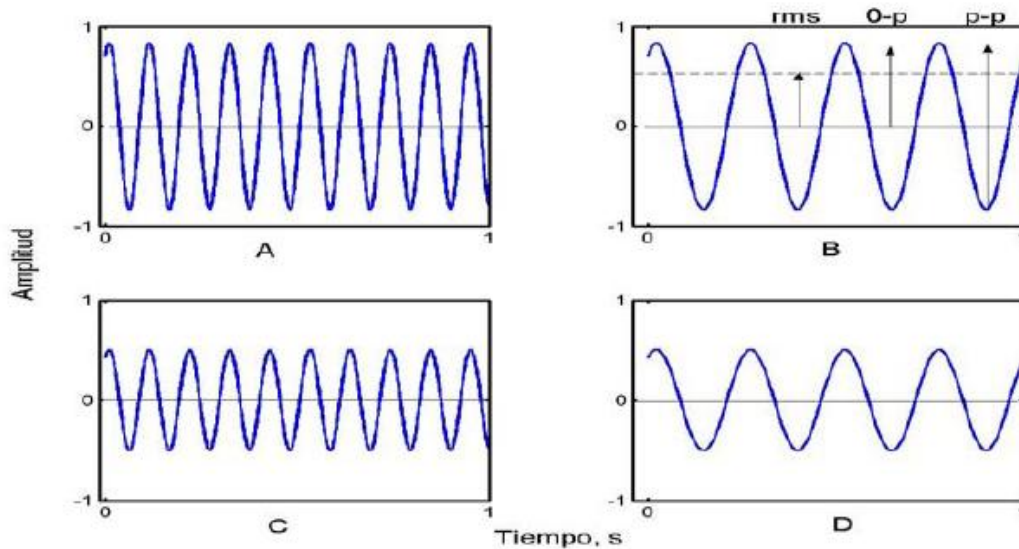


Figura 1.2: Ejemplos de ondas con la misma frecuencia y distinto nivel o amplitud (parejas A-C y B-D). En C) se representan las expresiones más utilizadas para describir el nivel de la señal: rms, cero a pico (0-p) y pico a pico (peak to peak, p-p). Los picos representan la máxima presión positiva o negativa en la vibración de la onda. Fuente: MAGRAMA 2012

La Impedancia (Z): Producto de la densidad (ρ) y la velocidad de la onda (c). Indica la resistencia de las partículas a moverse

$$Z = \rho * c \quad \text{Velocidad del sonido en un medio abierto, } c, \text{ por la densidad del medio, } \rho$$
$$Z = v/p \quad \text{velocidad de la partícula en el medio entre la presión.}$$

1.2 El Decibelio

El decibelio es una unidad logarítmica. Las unidades logarítmicas son las más utilizadas para expresar valores de presión sonora y de otras magnitudes acústicas. La razón principal se debe a que el oído humano es capaz de percibir sonidos desde $20\mu\text{Pa}$ hasta 20 Pa , aproximadamente, es decir, en un rango de $1 : 106$, que resulta muy incómodo de manejar en unidades naturales. La segunda razón es que el oído presenta una respuesta logarítmica a las variaciones de nivel sonoro: un aumento del 50% de intensidad sonora no se percibe como un aumento del 50% de la intensidad percibida. Sin embargo, si se varía la intensidad sonora de forma logarítmica la sensación será un aumento lineal de la intensidad sonora percibida. Los decibelios (dB) son unidades adimensionales que expresan la relación entre dos potencias, siendo una de ellas el valor de referencia.

Se define 1 dB como:

Belio (Bel): expresión logarítmica de una potencia con respecto a otra de referencia



$Bel = \log_{10}(W_m/W_{ref})$; donde W_m es la potencia con la magnitud de referencia y W_{ref} es la potencia de referencia.

1 Decibelio (dB) = décima parte de un Bel

$$dB = 10 * \log_{10}(W_m/W_{ref})$$

donde W_m y W_{ref} son dos potencias en las mismas unidades.

Si $W = W_{ref}$, el resultado es de 0 dB. Si $W = 10W_{ref}$, el resultado es de 10 dB. Si $W = 2W_{ref}$, el resultado es de unos 3 dB: $10 \log_{10}(2) \approx 3$ dB.

NIVELES EN ACÚSTICA

Si trabajamos con **presión sonora** en el aire, el valor de referencia para el cálculo en dB es $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa (20 μ Pa). Este valor es aproximadamente el umbral de audición humana a 1 kHz. Las unidades resultantes son dB de presión sonora referidos a 20 μ Pa:

$$NPS \text{ (Nivel de presión sonora)} = SPL \text{ (Sound pressure level)} = 10 * \log (p_{rms}^2/p_{ref}^2) \text{ dB re } 20\mu \text{ Pa}$$

A esta relación se la denomina Nivel de Presión Sonora.

Si operamos con **intensidad sonora**, el valor de referencia es $I_0 = 1pW/m^2 = 10^{-12} W/m^2$. Las unidades resultantes son dB de nivel de intensidad sonora:

$$NI \text{ (Nivel de Intensidad)} = 10 * \log_{10} (I/I_0)$$

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

$$L_w = 10 \log_{10}(W/W_0)$$

NIVELES ACÚSTICOS EN EL MAR

En el mar, al no basarse las unidades de medida en el ser humano, para la presión sonora se utiliza la referencia de 1 μ Pa, y los niveles de presión sonora se miden en dB re 1 μ Pa. Al pasar del aire al mar, el cambio de presión de referencia (de 20 μ Pa a 1 μ Pa) corresponde a 26 dB, ya que

$$20 * \log (20) \approx 26dB$$

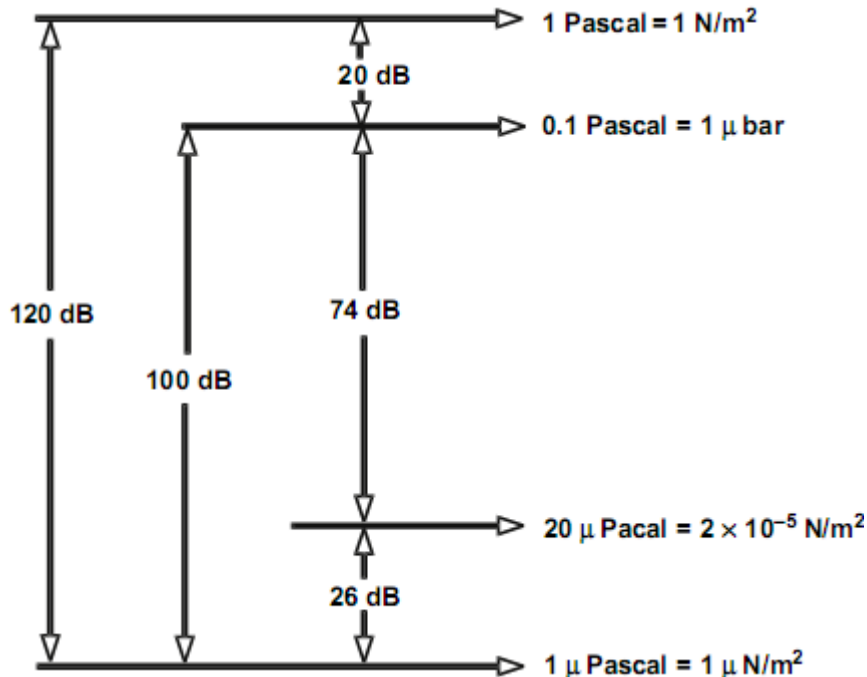


Figura 1.3: Relación entre la presión sonora y los decibelios en el agua de mar

Por otro lado, dado que la impedancia del medio (z) es distinta en el mar ($1,5 \cdot 10^6$ Rayls) y en el aire (415 Rayls), y que la relación entre la intensidad y la presión en campo libre viene dada por la expresión $I=p^2/z$, una misma presión ejercida en el mar provoca una intensidad 36 dB mayor que en el aire.

$$10\log_{10}(1,5 \cdot 10^6/415) \approx 36dB$$

Por tanto, como consecuencia de los cambios en la presión de referencia y en la impedancia del medio, una presión P provocará una intensidad I dB en el aire, equivalente matemáticamente a una intensidad $I+62$ dB en el mar.

A continuación se muestran diferentes parámetros utilizados para obtener o dar valores de acústica submarina.

1.2.1 Raíz Cuadrática Media (RMS)

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

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

donde T es la duración de la señal y $x(t)$ son los valores de presión de la misma

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

1.2.2 Nivel de Exposición Sonora (Sound Exposure Level, SEL)

El SEL es una medida de la energía de una señal acústica, por lo que depende tanto de su amplitud como de la duración de la misma. Se calcula como la integral de los valores de presión instantánea al cuadrado, normalizada a una presión de referencia al cuadrado, durante 1 segundo. Así, para medidas de sonido submarino el SEL está referenciado a $1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$. La fórmula es la siguiente:

$$\text{SEL} = 10 \log_{10} \left(\int_T (P^2 / P_{\text{ref}}^2) dt \right), \text{ con } P_{\text{ref}} = 1 \mu\text{Pa}$$

donde T es la duración de la señal y $x(t)$ son los valores de presión de la misma.

Sirve para comparar sucesos sonoros de distintas presiones máximas y duraciones, al referirlas a un tiempo de 1 segundo. Cuando el periodo de tiempo del sonido es menor que un segundo, el RMS será mayor que el SEL. Para señales mayores de un segundo, el SEL será mayor que el RMS.

1.2.3 Nivel de pico

Los niveles sonoros pico es el valor absoluto máximo instantáneo que puede ser recogido en un intervalo de tiempo determinado. El valor absoluto puede medirse de máxima amplitud a nivel de referencia (0-p) o de máxima a mínima amplitud (p-p). Ambos tipos de medida son igualmente válidos y esta unidad no está estandarizada. El nivel de pico mostrará si una señal puede producir un daño fisiológico debido a una presión muy alta, aunque sea instantánea.

Nivel de pico:

$$N_{0-p} (\text{cero-a-pico}) = 20 \log_{10} (P_{\text{pico}} / P_{\text{ref}})$$

$$N_{p-p} (\text{pico-pico}) = 20 \log_{10} (P_{\text{pico}+} / P_{\text{pico}-})$$

En la Figura 1.4 se representa gráficamente algunos tipos de medidas expuestas anteriormente.

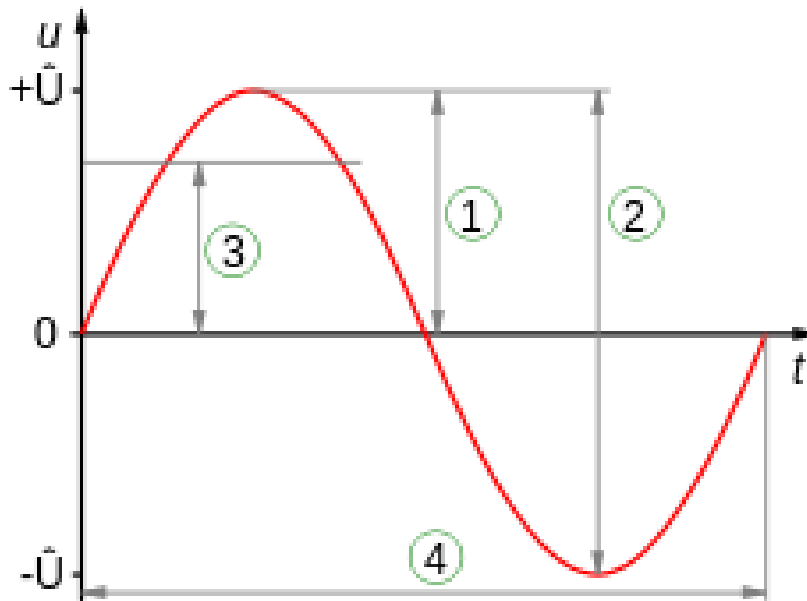


Figura 1.4 Representación de una onda acústica y de las diferentes medidas de 1)Amplitud; 2)pico a pico; 3)RMS; 4) Periodo T

1.3 Ondas sísmicas

La energía acústica en el agua consiste en vibraciones moleculares que viajan a la velocidad del sonido. Las vibraciones en el agua y otros fluidos ocurren en la dirección de la propagación y se definen como **ondas longitudinales**. En medios elásticos (medios que se deforman y recuperan con el paso de una perturbación mecánica) las vibraciones acústicas pueden ocurrir en la dirección perpendicular a la dirección de propagación y se definen como **ondas transversales**. En la Figura 1.5 se muestran los dos tipos de ondas.

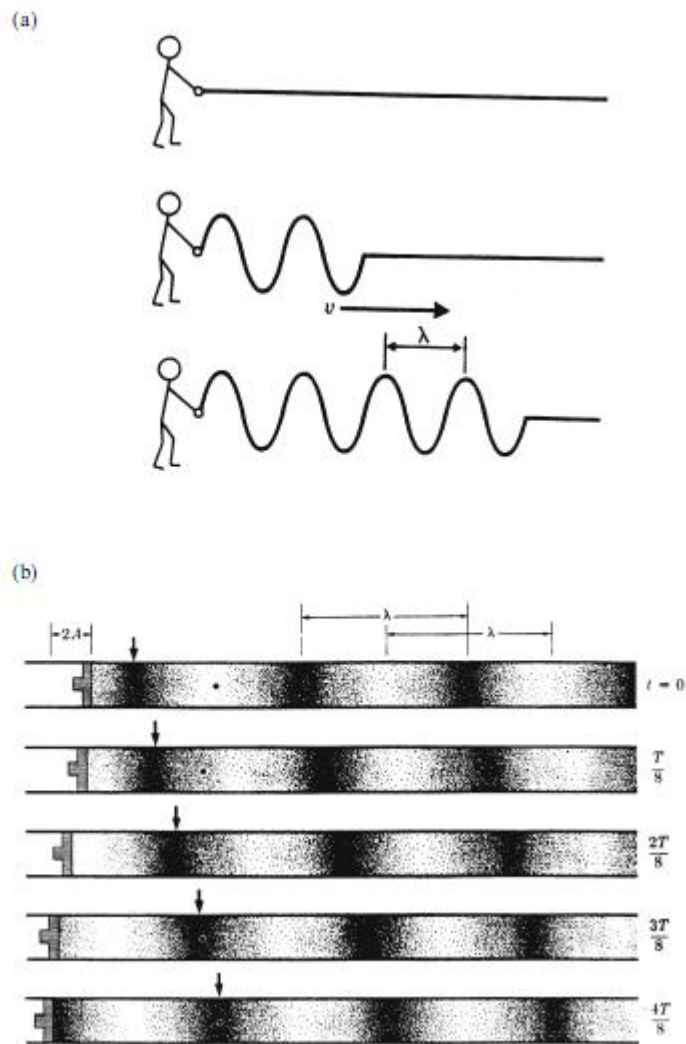


Figura 1.5: (a) Ejemplo de onda transversal; b) Ejemplo de compresión y refracción de una onda longitudinal viajando a través del medio. Fuente: Whitlow y Hastings (2008). Principles of Marine Bioacoustics.

1.4 Propagación del sonido

Conocer la velocidad del sonido en el agua es crítica para muchas de las aplicaciones de oceanografía acústica. La primera medición de la velocidad fue hecha por Colladon y Sturm (1827) en el Lago Lemán (Ginebra, Suiza). Se encontró un valor de 1435 m/s, aunque pronto se dieron cuenta de que la velocidad en el agua salina es algo mayor y que en general la temperatura del agua tiene mayor influencia que la salinidad en la velocidad del sonido (Figura 1.6).

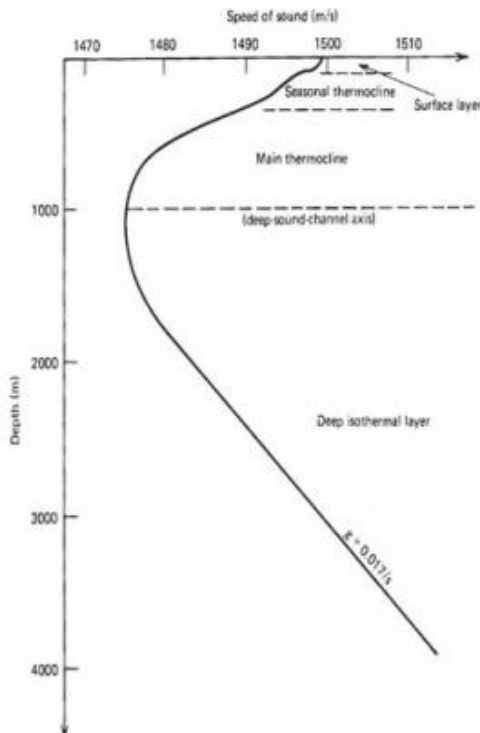


Figura 1.6: Representación del perfil de la velocidad del sonido en el océano profundo (Urick 1983)

Posteriores mediciones tanto en campo como en el laboratorio han demostrado que la velocidad del sonido en el mar depende de la temperatura, la profundidad y la cantidad de sales disueltas en el agua. Una fórmula simplificada para calcular la velocidad en m/s, con una precisión de 0,1 m/s (pero válida solo a 1 kilómetro de profundidad y temperaturas entre 0°C y 35°C y menos de 45 partes por mil de salinidad), fue propuesta por Medwin (1975):

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.010T)(S - 35) + 0.016z$$

donde T es la temperatura en grados centígrados, la salinidad S es partes por mil de peso disuelto de sales, y la profundidad z está en metros.

1.4.1 Pérdida por transmisión

La pérdida por transmisión se refiere a la atenuación de una señal acústica debido a la pérdida de intensidad cuando una señal se desplaza por un medio. La pérdida de intensidad depende de dos fenómenos, la **absorción** y la **divergencia de energía**.

1.4.1.1 Pérdida por absorción

El nivel de **absorción de la energía** acústica depende de la longitud de onda de la señal. Ondas de alta frecuencia, con muy pequeña longitud de onda, chocan con las moléculas de agua, las hacen vibrar y pierden energía que es absorbida en esta vibración (Figura 1.7). Cuanto menor

sea la frecuencia, y por tanto más largas las ondas, tienden a no chocar sino “mecer” las moléculas de agua y, por tanto, reducen la pérdida de energía por absorción.

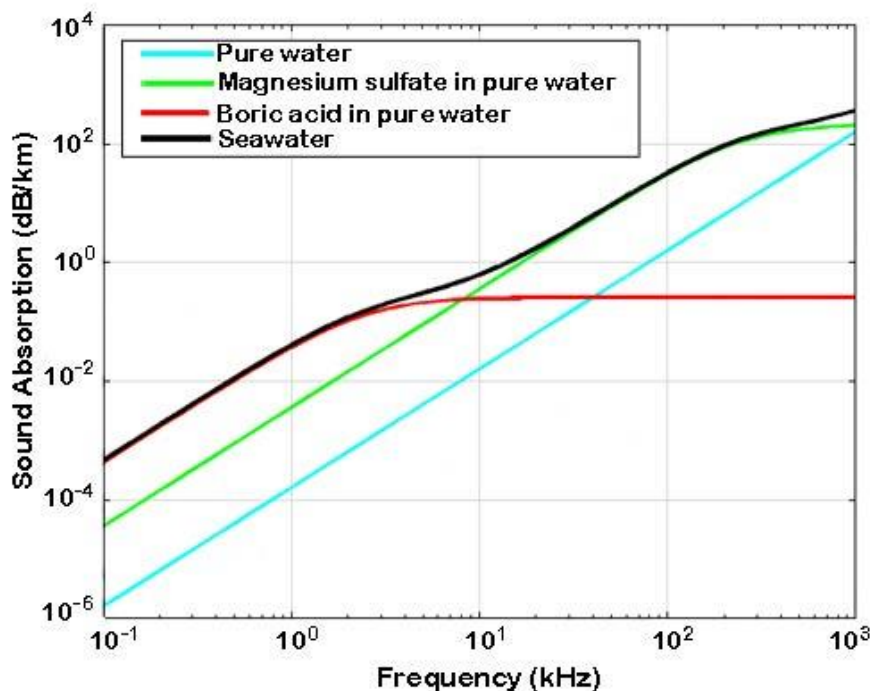


Figura 1.7: Pérdida por absorción

1.4.1.2 Pérdida por divergencia

Aunque la pérdida de energía por absorción sea despreciable para las frecuencias bajas, todos los sonidos sufren una **pérdida por divergencia**. Esta pérdida se debe a que la energía que se concentraba en un punto de emisión, al expandirse, se reparte en un espacio mucho mayor y, por tanto, la intensidad en cada punto de recepción se reduce.

Existen tres tipos de divergencia (plana, cilíndrica y esférica). En un medio homogéneo (mismas propiedades físicas en todos los puntos), isotrópico (mismas propiedades de propagación en todas las direcciones) la propagación del sonido es **esférica** (Figura 1.8). Esto se asume en el mar para aguas profundas. Entonces, la pérdida por transmisión responde a la siguiente ecuación:

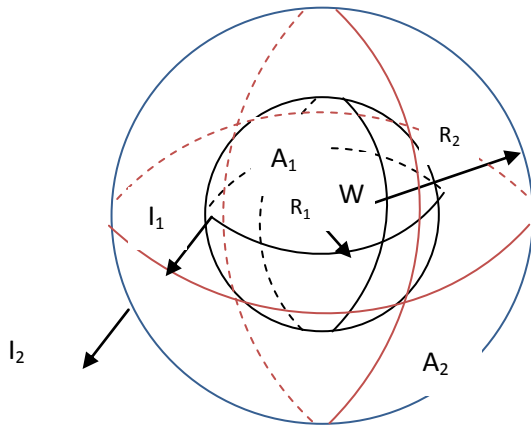


Figura 1.8: Adaptada Medwin y Clay 1998. Fundamentals of Acoustical Oceanography

$$I_1 = W/A_1 = W / 4 \cdot \pi \cdot R_1^2$$

$$I_2 = W/A_2 = W / 4 \cdot \pi \cdot R_2^2$$

$$\Delta dB = NI_1 - NI_2 = 10 \cdot \log(I_1 / 1_{pW/m^2}) - 10 \cdot \log(I_2 / 1_{pW/m^2}) = 10 \cdot \log[(I_1 / 1_{pW/m^2}) / (I_2 / 1_{pW/m^2})] = 10 \cdot \log(I_1 / I_2) = 10 \cdot \log(R_2^2 / R_1^2) = 20 \cdot \log(R_2 / R_1)$$

El sonido en el mar sigue normalmente una **propagación esférica**, que implica que la intensidad disminuye 6 dB cada vez que se dobla la distancia desde la fuente emisora.

Sin embargo, en medios no homogéneos como las aguas someras, la señal experimenta una **propagación cilíndrica**, dado que las ondas se ven reflejadas por la superficie y por el fondo marino. Ello implica que la pérdida de intensidad es de sólo 3 dB cada vez que se dobla la distancia.

1.4.2 El canal de sonido profundo-SOFAR

El perfil de la velocidad del sonido de la Figura 1.6 es un perfil típico de la velocidad del sonido en zonas profundas del océano a latitudes medias. Existe una zona de velocidades mínimas a aproximadamente 1000m, en la que los rayos acústicos tienden a experimentar una pérdida por transmisión mínima, ya que tienden a reflejarse hacia un canal cuando alcanzan zonas de mayor velocidad, alcanzando distancias enormes, es el llamado canal SOFAR (Sound Fixing and Ranging Channel). Se han llevado a cabo varios experimentos de transmisión acústica en los que se situaron emisores de baja frecuencia y gran potencia a profundidad de este canal. Un ejemplo de estos experimentos, que demuestran que la transmisión del sonido de baja frecuencia a miles de kilómetros es posible, se presenta en la Figura 1.9.

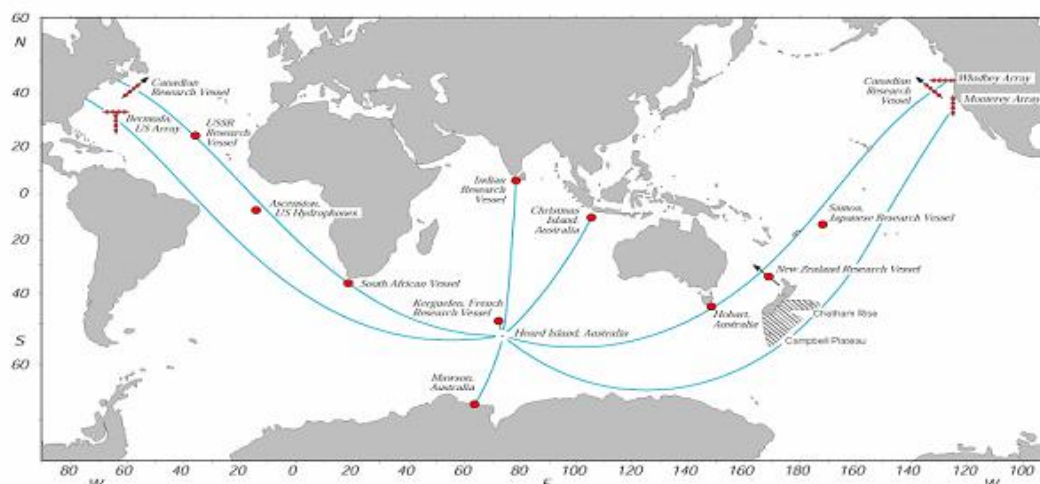


Figura 1.9: Ejemplo de la transmisión a largas distancias de sonidos de alta potencia y baja frecuencia. Experimento Heard Island: sonidos emitidos dentro de un canal sonoro de profundidad cerca de la Antártida fueron recibidos en todos los océanos (Figura de <http://909ers.apl.washington.edu>). Fuente: MAGRAMA 2012

Estos modelos de transmisión no consideran que las fuentes acústicas de alta intensidad puedan producir ecos en el fondo marino. Si los sonidos son además de bajas frecuencias, con poca atenuación por absorción, pueden darse reflejos múltiples fondo-superficie-fondo, cuyas ondas de presión confluyen en los llamados “**puntos de convergencia**” de alta presión acústica, creados a veces a varios kilómetros de distancia desde la fuente, y dejar “**zonas de sombra**” entre estos puntos de convergencia. Estos fenómenos son importantes a la hora de evaluar los efectos del ruido sobre la fauna marina, así como las respuestas de comportamiento ante sonidos recibidos a distancia, dado que se genera la contradicción aparente de que un animal, localizado en una zona de sombra, pueda acercarse a la fuente de emisión para intentar evitar una zona de convergencia más lejana, quedando por tanto rodeado por áreas con mayor nivel de exposición sonora.

1.4.3 Ecuación de SONAR

El **sonar** (*Sound Navigation And Ranging System*, ‘navegación por sonido’) es una técnica que usa la propagación del sonido bajo el agua (principalmente) para navegar, comunicarse o detectar objetos sumergidos.

El sonar puede usarse como medio de localización acústica, funcionando de forma similar al radar, con la diferencia de que en lugar de emitir señales de radioelectrónica se emplean impulsos sonoros. La señal acústica puede ser generada por piezoelectricidad o por magnetostricción.

La “**ecuación de sonar**” es una forma sistemática de estimar el nivel de sonido que será recibido por un receptor SONAR.

Aunque la ecuación de SONAR está pensada para un receptor activo, es decir un receptor que ha emitido una señal y recibe su eco, la ecuación de SONAR simplificada puede ayudarnos a determinar el sonido recibido a una distancia de la fuente.

La relación de señal a ruido determina si un sonar será capaz de detectar una señal en presencia de ruido de fondo en el océano. Se tiene en cuenta el **nivel de la fuente**, la **pérdida por absorción**, la **pérdida por divergencia**, las pérdidas por **reflexión**, el **ruido ambiental**, y las **características del receptor**.

$$SNR=RL-NL=SL-2TL+TS-NL$$

Donde RL (Received Level) es el Nivel recibido, SL (Source Level) es el nivel de la fuente, TL (transmission loss) la pérdida por transmisión, TS es el “target strength”, que es la capacidad de un objeto para reflejar un sonido o coeficiente de *reflectabilidad acústica* (cetáceo, subsuelo, banco de peces, etc) y NL (noise level) es el ruido ambiente.



Sin embargo podemos simplificar la ecuación de del sonar activo a la ecuación del sonar pasivo (receptor).

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

Intensidad de la Señal Recibida (decibelios) $RL= SL-TL$

y si el nivel de ruido en el receptor es NL decibelios, entonces la relación del nivel de señal al nivel de ruido en el receptor, llamado la relación señal-ruido (SNR) es:

$$\text{SNR (dB)} = \text{SL-TL} - \text{NL}$$

Que es lo mismo que $\text{SNR} = \text{RL} - \text{NL}$

Receptores de gran tamaño son capaces de mirar en una dirección específica y rechazar el ruido de las otras direcciones. El nivel efectivo de ruido se reduce entonces por la matriz de ganancia AG, dado en decibelios, y la SNR se incrementa:

$$\text{SNR (dB)} = \text{SL-TL} - (\text{NL} - \text{AG})$$

La ecuación del sonar pasivo es mucho más simple que la ecuación del sonar activo, porque los sonares pasivos no escuchan los ecos que regresan de un objetivo. La pérdida de transmisión TL aparece sólo una vez, ya que sólo las transmisiones unidireccionales están involucradas.

1.5 Las octavas y los tercios de octava

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

El término de octava se toma de una escala musical. La octava es el intervalo entre dos sonidos que tienen una relación de frecuencias igual a 1:2 y que corresponde a ocho notas de una escala musical diatónica (escala formada por notas separadas en intervalos de un semitono cada una).

La octava se puede dividir en valores más pequeños, por ejemplo: la media octava (divide cada octava en dos) y el tercio de octava (cada intervalo de la octava se divide en tres partes). El análisis en tercios de octava es frecuente porque se aproxima al procesado espectral del oído humano, por lo que es la mejor idea que tenemos del funcionamiento del oído de otros mamíferos.

2. LOS MAMÍFEROS MARINOS Y EL SONIDO

Los mamíferos marinos en general y en especial los cetáceos han adaptado sus capacidades de comunicación, socialización y alimentación a un medio en el cuál el sonido viaja a unos 1500m/s, 5 veces más rápido que en el aire (334 m/s). Además, aunque los mamíferos marinos tienen una buena vista, la luz desaparece en el océano a partir de los 100 metros de profundidad. Si pensamos que algunos de estos animales alcanzan profundidades de hasta 3000 metros, entenderemos la importancia del sonido y del uso de este para su supervivencia.

El sonido viaja más lejos bajo el agua que en el aire, por lo que en el medio marino los animales reciben el sonido de fuentes de ruido más lejanas que en tierra.

Los cetáceos utilizan estas dos características (velocidad y distancia) del sonido en el agua para diferentes usos y han desarrollado sistemas tan complejos de orientación, como el de la ecolocalización. Este sistema utiliza sonidos de altas frecuencias, denominados clicks, que son producidos en los “labios fónicos” del espiráculo de algunos cetáceos (odontocetos), atravesando direccionalmente un órgano denominado melón, que permiten a través de la recepción del eco identificar objetos, orientarse y alimentarse (Figura 2.1)

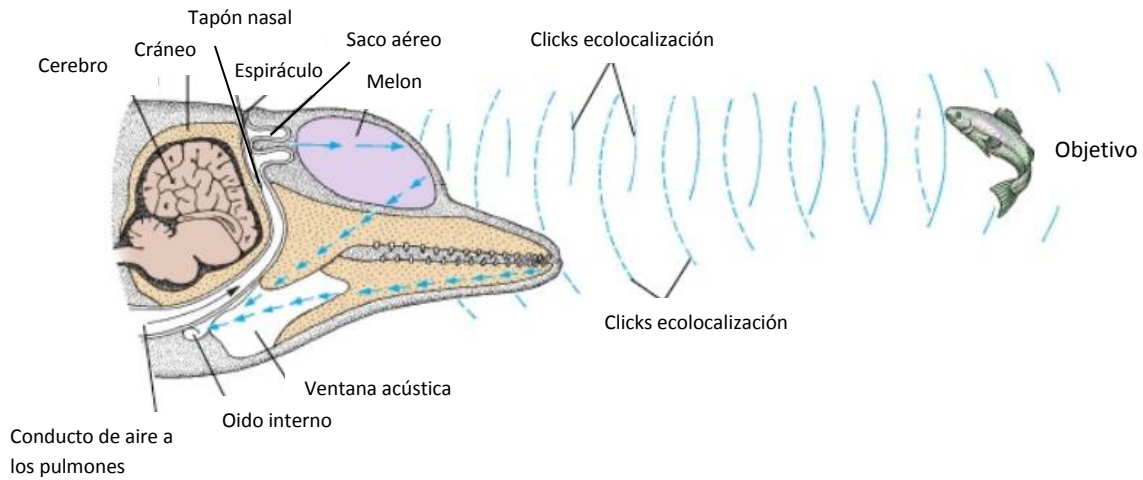


Figura 2.1: Esquema de ecolocalización (Modificado de Castro P y Huber ME, *Marine Biology*, Mc Graw Hill Ed.)

2.1 Sonidos Tonales

Un sonido tonal se produce cuando hay una sola frecuencia dominante en cualquier instante en el tiempo, como por ejemplo el sonido generado por un diapasón. Mediante la transformada de Fourier podemos representar el contenido en frecuencia de un sonido, que en el caso de ser un tono puro tendrá idealmente una representación como la de la figura, denominada **espectro** (Figura 2.2)

Amplitud

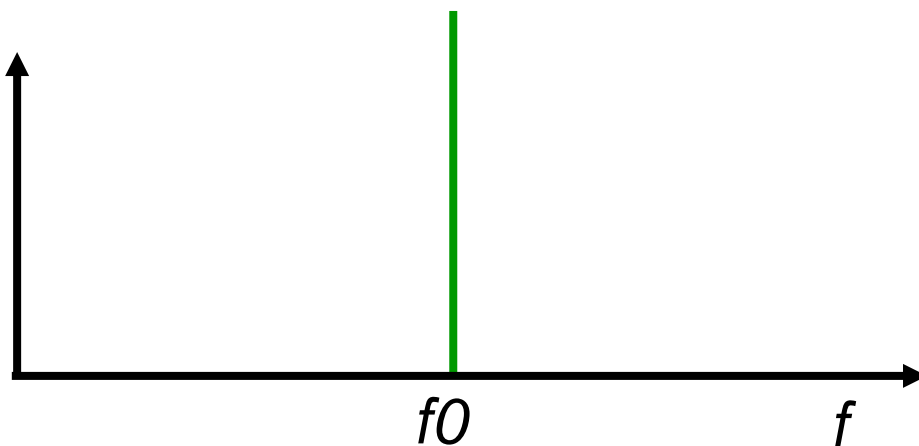


Figura 2.2: Representación del espectro de una señal monocromática

Para representar la variación del espectro de un sonido con el tiempo se emplea el **espectrograma**. Un tono puro de frecuencia constante en el tiempo tendrá idealmente un espectrograma como el de la figura 2.3

El espectrograma más simple de un sonido tonal es una línea plana (un sonido constante a lo largo del tiempo en la misma frecuencia) (Figura 2.3)

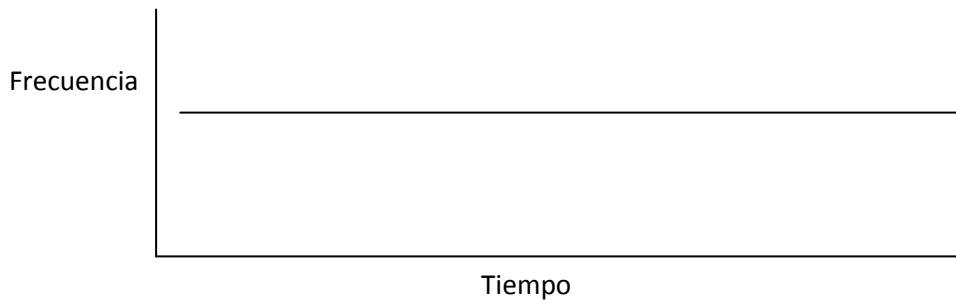


Figura 2.3: Espectrograma de una señal constante monocromática

Sin embargo, no muchos animales producen sonidos tonales como el representado en la Figura 2.3, si no que modulan la frecuencia, por lo que el sonido continuo asciende o desciende con el tiempo en el espectro, aunque en cada instante en el tiempo se produce una frecuencia única, por lo que se consideran sonidos tonales modulados. Los delfines producen sonidos tonales denominados silbidos.

2.1.1 Silbidos (Whistles)

Los silbidos son **sonidos tonales de frecuencia modulada**, producidos por muchas especies de odontocetos (aunque no por todas) como una forma de comunicación social o intraespecífica. Normalmente, el rango de frecuencia del componente fundamental de un silbido se encuentra entre 2kHz y 15 kHz, aunque se han registrado silbidos más allá de 20 kHz. Existen muchos tipos de silbidos, con contornos muy diversos e incluso los denominados “silbidos firma”, que identifican a cada individuo, por ejemplo, en el delfín mular, aunque se ha sugerido en algunas otras especies de odontocetos.

A continuación se muestran algunos ejemplos de silbidos registrados por diversas especies de odontocetos, que pueden ser comúnmente registradas en nuestras aguas (Figuras 2.4;2.5;2.6;2.7). Es importante tener en cuenta que no puede distinguirse una especie con solo unos segundos de silbidos, si no que debemos observar el patrón general durante un tiempo para poder confirmarla:

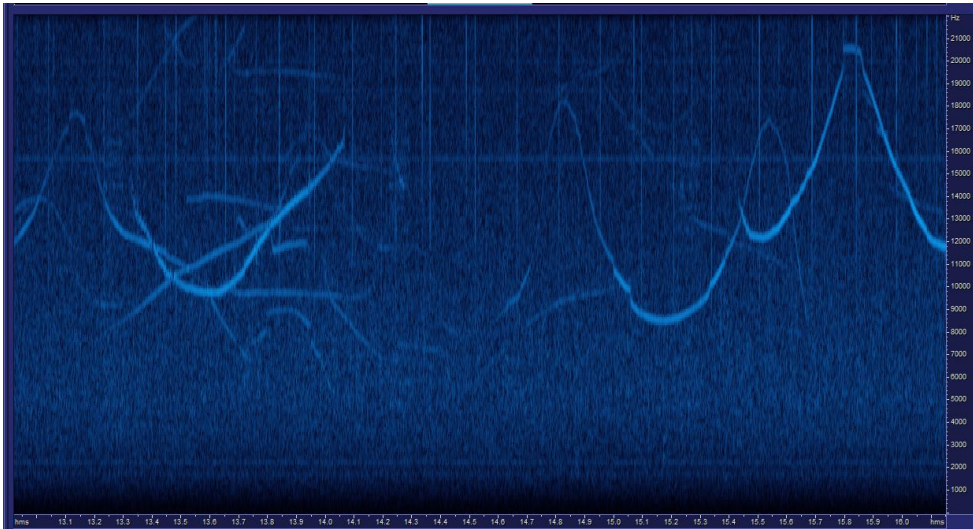


Figura 2.4: Silbidos y clicks de ecolocalización de **delfines comunes**. Esta especie emite silbidos muy parecidos a los del delfín listado, generalmente entre 12 y 15 kHz, por lo que sólo una persona con una larga experiencia podrá distinguir las dos especies.

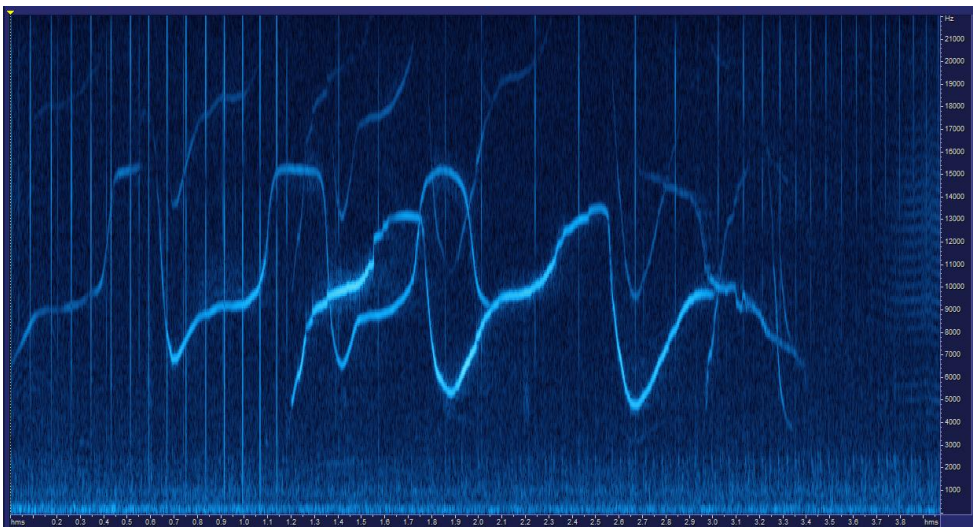


Figura 2.5: Silbidos y clicks de ecolocalización de delfín mulares. Por lo general los delfines mulares silban entre 10 y 12 kHz, aunque eso no quiere decir que no podamos encontrar silbidos por encima o debajo de estas frecuencias.

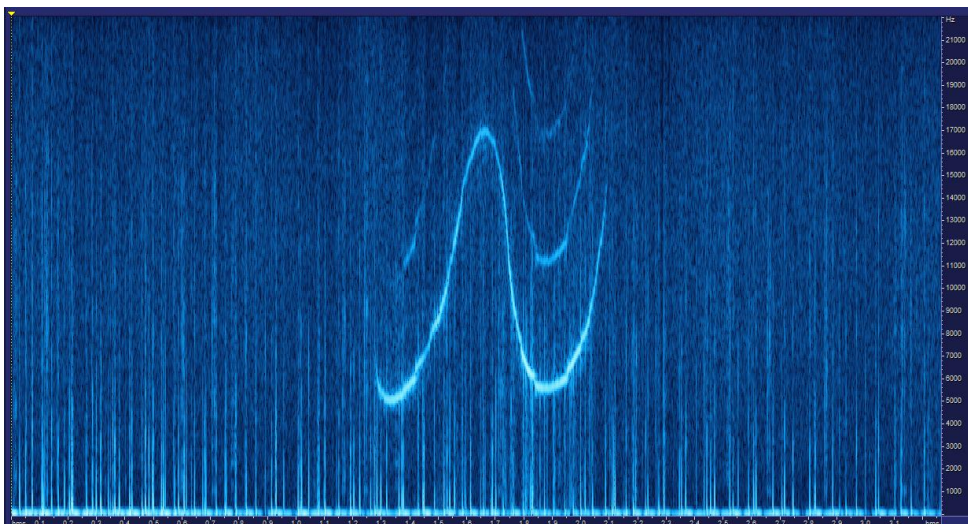


Figura 2.6: Silbidos y clicks de ecolocalización de delfín de Risso, juntamente con sonidos pulsados propios de socialización.

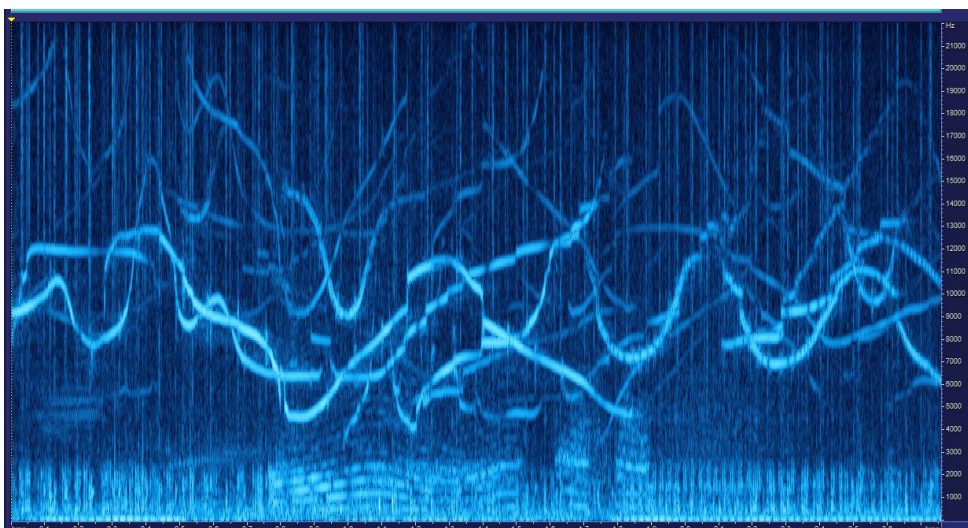


Figura 2.7: Silbidos y clicks de ecolocalización de delfín listado.

2.1.2 Armónicos

Los armónicos son **múltiplos íntegros de una misma frecuencia fundamental** ($2x$, $3x$, $4x$). Las ondas de todos los sonidos, a excepción de una onda sinusoidal básica, se componen del tono fundamental y de muchos otros tonos de distintas frecuencias. Los tonos no fundamentales que son múltiplos enteros del tono fundamental se conocen como *armónicos superiores* o *armónicos*. Los armónicos siempre aparecen en frecuencias superiores al componente fundamental de un sonido tonal y tienen menor intensidad que los componentes fundamentales y por tanto son detectables solo a distancias relativamente cortas (Figura 2.8). En algunos casos, debido a las condiciones de propagación, los armónicos pueden presentarse con mayor intensidad que el componente fundamental.

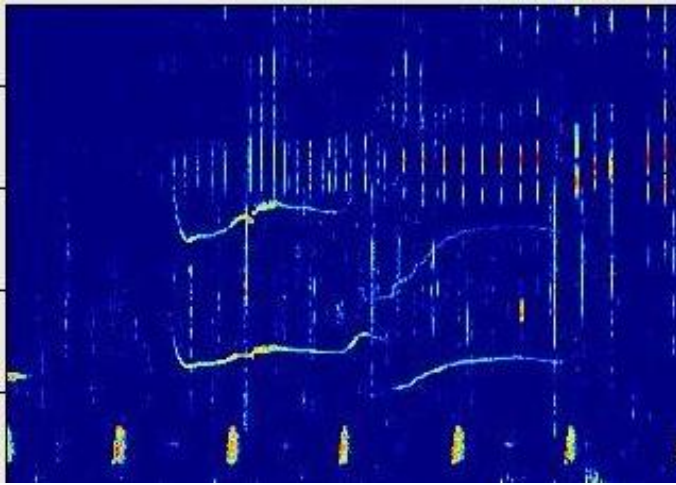


Figura 2.8: Silbidos y clicks de ecolocalización del delfín de Risso. Esta especie se caracteriza por tener muchos armónicos.

2.2 Sonidos pulsados

Los **sonidos pulsados**, difieren de los tonales o de frecuencia modulada principalmente en que no son sonidos continuos y son de amplio espectro cubriendo un gran rango de frecuencias. La duración de cada pulso es de entre 50 y 200 microsegundos y cubren un gran rango de frecuencias (Figura 2.9). Los sonidos pulsados son utilizados por los odontocetos de dos maneras, como sonidos sociales o como señal de ecolocalización. Los sonidos pulsados de carácter social suelen ser de mayor duración y producidos en series cortas. Los pulsos utilizados en ecolocalización se denominan **clicks** y son de muy corta duración y pueden ser producidos en series largas. Los ecos de estos clicks se usan para obtener información del entorno y detectar e identificar presas. Una serie de clicks se demonina **tren de clicks**. El rango de frecuencias utilizado en la ecolocalización varía con cada especie.

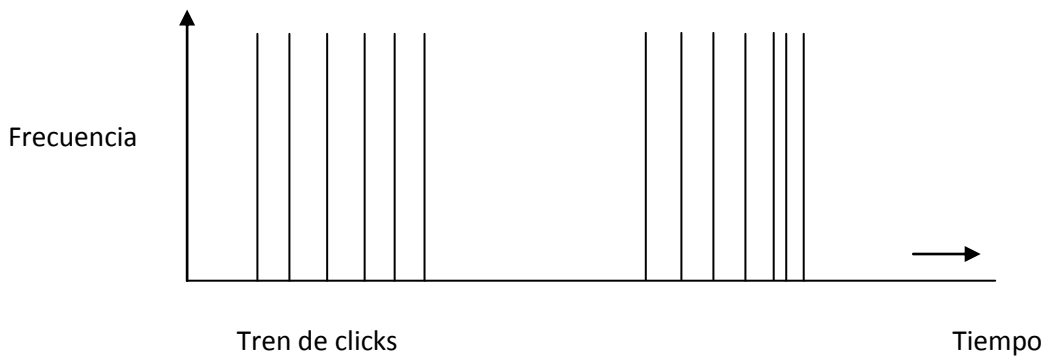


Figura 2.9: Representación de un sonido pulsado en relación al tiempo y la frecuencia

Al contrario de los sonidos pulsados sociales, los clicks utilizados durante la ecolocalización son altamente direccionales, proyectando sonidos de muy alta intensidad (se han registrado

niveles de sonido de hasta 230 dB para algunos animales) por lo que en muchas ocasiones los trenes de clicks detectados en un hidrófono parecen más cortos de lo que son en realidad

Los sonidos pulsados se dividen básicamente en dos categorías (Figuras 2.10; 2.11; 2.12; 2.13):

2.2.1 Clicks de ecolocalización

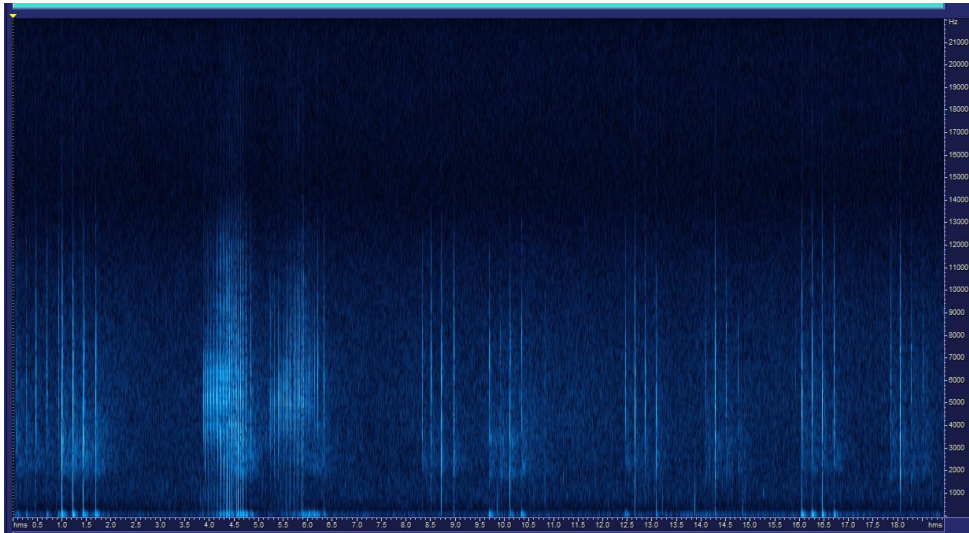


Figura 2.10: Clicks de cachalote. El patrón de buceo de los cachalotes es, en general muy estable y no suele moverse mucho del lugar en el que se sumerge. En caso de detectar cachalotes y poder determinar distancia y ángulo, deberemos esperar al menos una hora para el inicio de las actividades que generen ruido.

2.2.2 Zumbidos (Burst pulsed sounds)

Los zumbidos están relacionados con la ecolocalización y por tanto aparecen en el campo ultrasónico (> 20 kHz). Se trata de series de clicks muy juntos (Figura2.11).

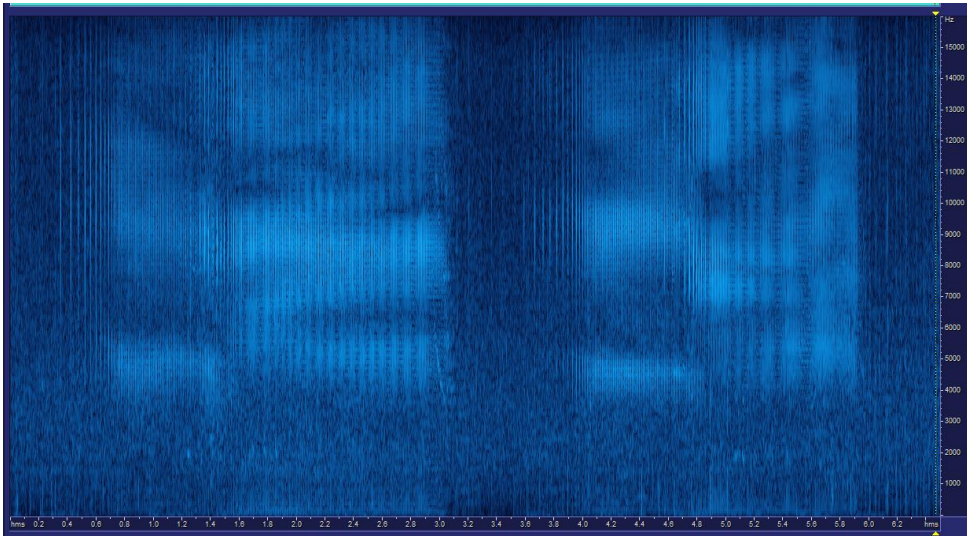


Figura 2.11: Zumbidos de Delfin de Risso (buzzes).

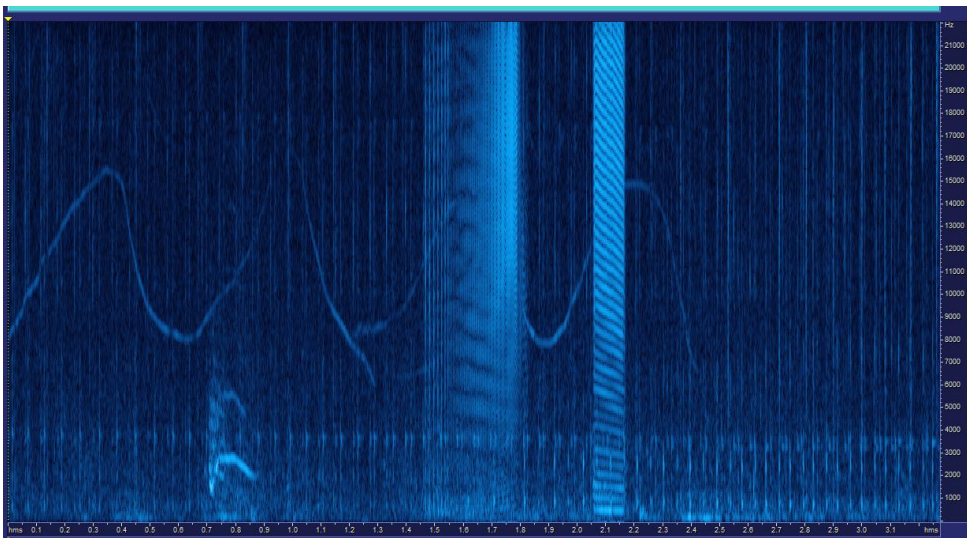


Figura 2.12: Silbidos, zumbidos y clicks de delfín mular

Sin embargo, algunos odontocetos (ej. orcas, calderones, delfin de Risso) suelen producir subidos de carácter social en frecuencias audibles (< 20 kHz) y se presentan con formas espectrales muy variadas en función de la resolución del espectro con el que se visualice la señal. En general pueden aparecer con o sin bandas, que son un producto del cómputo del espectro cuando el intervalo entre pulsos es extremadamente pequeño. No deben interpretarse como armónicos de una señal tonal ya que su naturaleza es pulsada. La figura 2.11 muestra dos ejemplos de zumbidos, el primero sin bandas y el segundo con bandas.

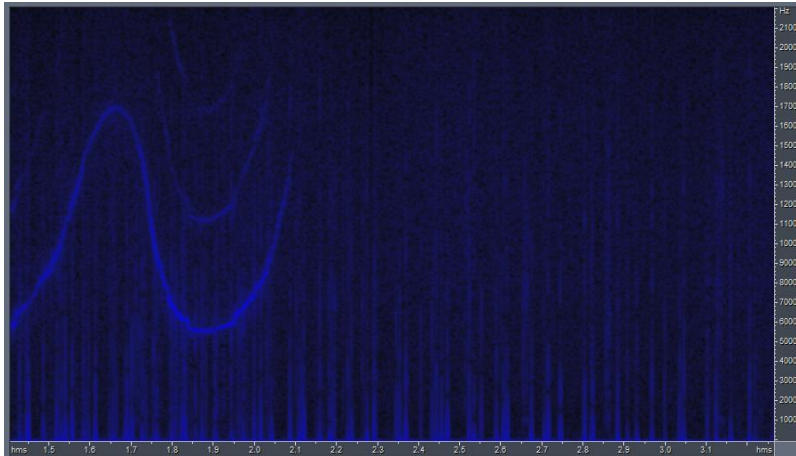


Figura 2.13: Pulsos sociales de delfín de Risso, con un silbido y sus armónicos. Los clicks del delfín de Risso están por encima de 20 kHz. No confundir con clicks de ecolocalización. Si podemos registrar los clicks de ecolocalización puede considerarse que el animal se encontrará en un rango cercano al hidrófono, puesto que las frecuencias altas presentan una gran pérdida por transmisión.

3. RUIDO AMBIENTE

En el océano existe una gran variedad de sonidos naturales, como las olas, el viento, movimientos sísmicos naturales (tsunamis, volcanes, etc), fauna marina como crustáceos o los propios mamíferos marinos. Pero también existen fuentes de ruido contaminantes, que proceden de actividades humanas, como el ruido del tráfico marítimo, explosiones, sónares militares, prospecciones sísmicas, etc (Figura 3.1).

El seguimiento acústico, no será siempre tan claro como las representaciones en los espectrogramas mostrados en el punto 2.1 y 2.2, pues generalmente el medio incluye ruido ambiente que proveniente de multitud de fuentes simultáneas tanto naturales como de carácter antrópico (Figura 3.2)., que puede dificultar la detección de sonidos producidos por mamíferos marinos, por un efecto de solapamiento en el mismo rango de frecuencias (denominado **enmascaramiento de señal**). Este efecto será más pronunciado si la señal de interés es de menor intensidad que el ruido que lo enmascara

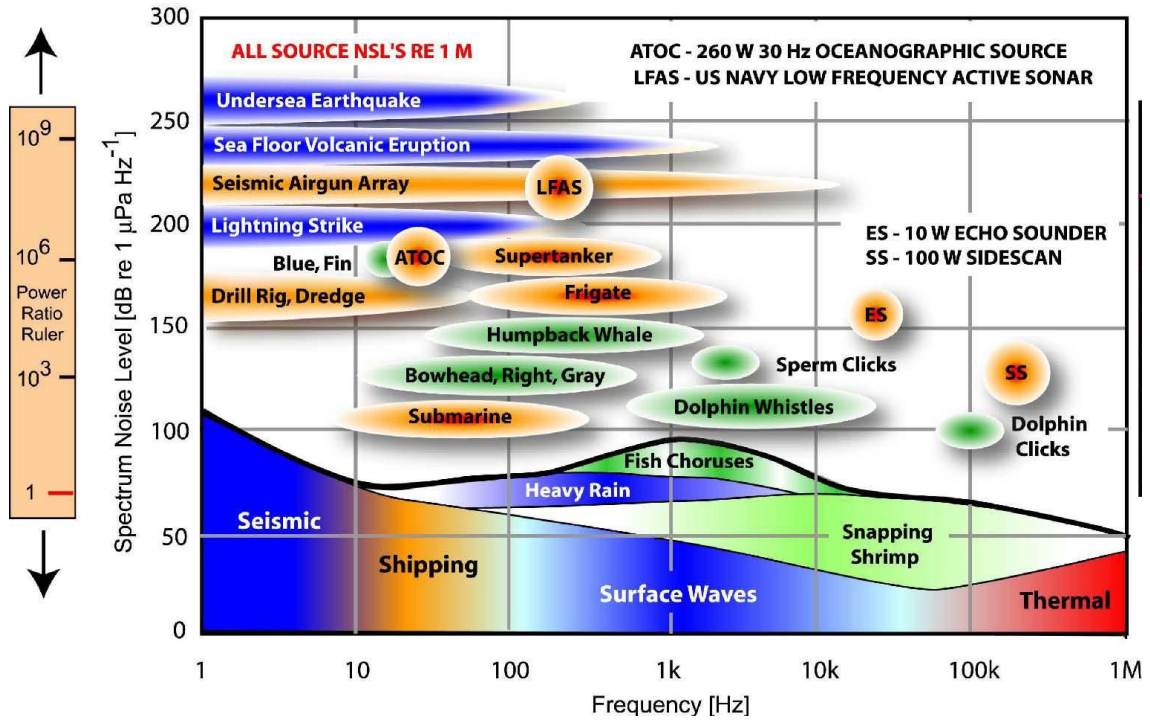


Figura 3.1: Fuentes de ruido en el medio marino. Se muestran en naranja las fuentes de ruido artificiales, en azul las naturales y en verde las que provienen de la fauna marina. © Seiche Ltd. 2006, Coates, R., *The Advanced SONAR Course*, Seiche (2002) ISBN 1-904055-01-X.

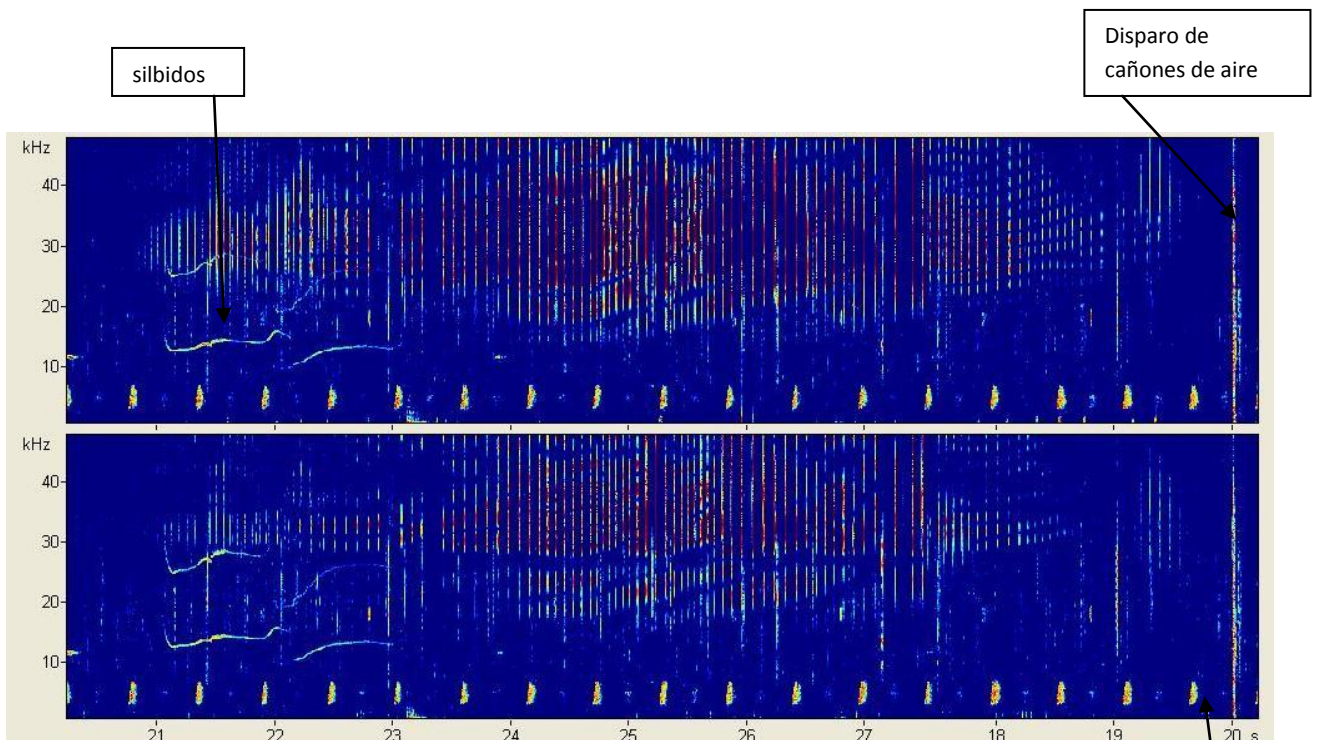


Figura 3.2: Representación de un espectrograma típico durante una operación sísmica, en la que se observan los disparos, el perfilador de fondo y silbidos de cetáceos

4. EQUIPO BÁSICO DEL PAM

Existen diferentes configuraciones, pero en general los equipos de seguimiento acústico pasivo utilizan hidrófonos de arrastre multicanal (Figura 4.1), los cuales cuentan con varios elementos y preamplificadores en la sección de recepción que se encuentra en la parte distal del sistema, arrastrado desde la popa de la embarcación. Esta sección está conectada a la embarcación por medio de un cable de tracción de varios cientos de metros de longitud que transmite la señal de los hidrófonos a la estación de adquisición ubicada en la embarcación. La adquisición generalmente se compone de tres pasos, el acondicionado que filtra las frecuencias no deseadas para el análisis, la amplificación que se aplica a la parte de señal a analizar y el digitalizado para su proceso y almacenado en un ordenador.



Figura 4.1: Sistema de hidrófono de arrastre © Università degli Studi di Pavia

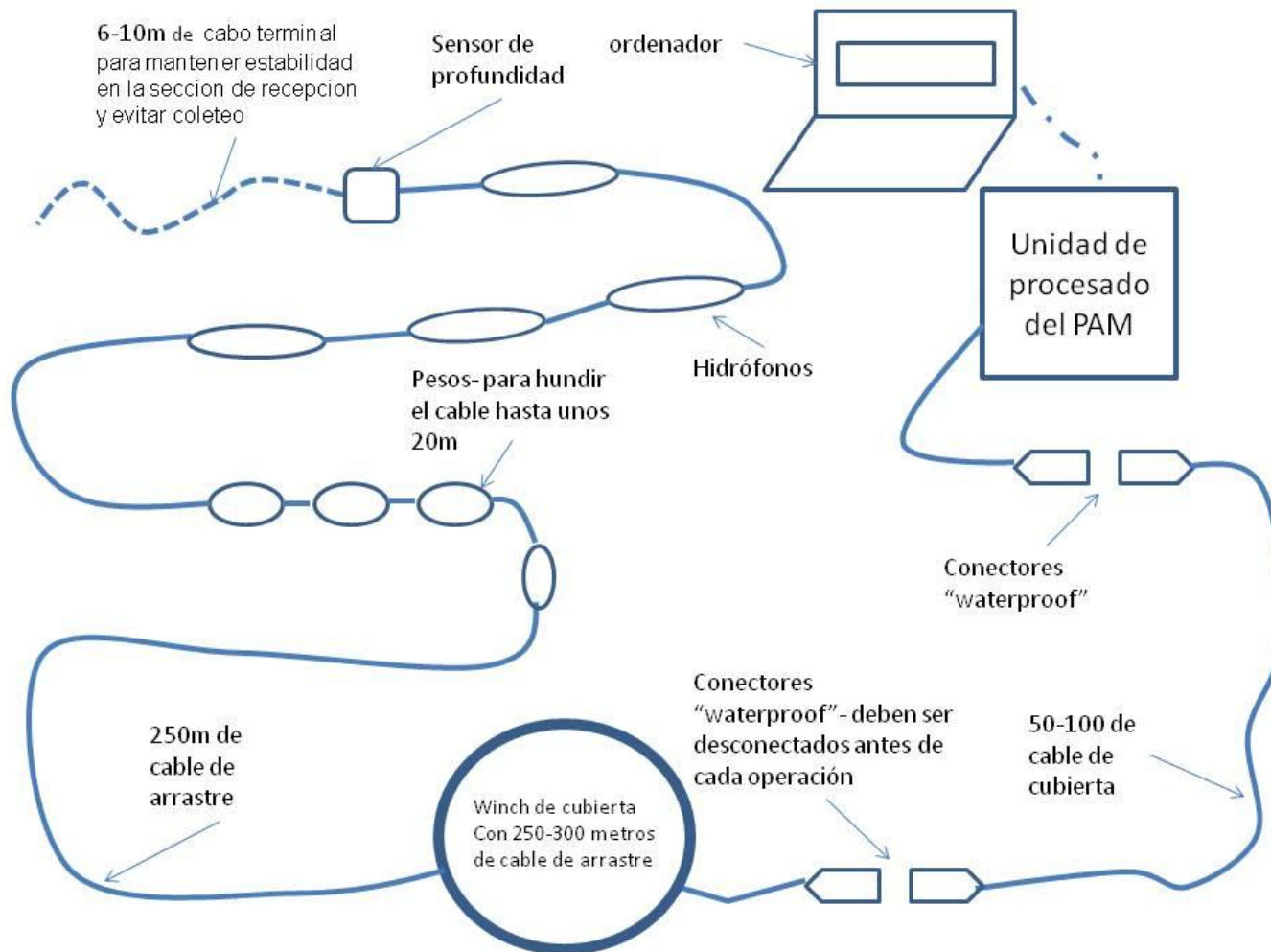


Figura 4.2: Esquema de un equipo PAM. Adaptado de Intelligent Ocean (Passive Acoustic Monitoring training)

4.1 Componentes del equipo de seguimiento acústico pasivo (PAM)

La Figura 4.2 muestra los componentes básicos que podemos encontrar en un equipo de acústica pasiva. A continuación describiremos algunos de estos elementos:

4.1.1 Sección de recepción o matriz del hidrófono

La sección de recepción puede ser un tubo de plástico, el cual contiene los diferentes elementos y está lleno de aceite (hidrófono de arrastre de aceite) o de espuma sintáctica para mantener una flotabilidad neutra y maximizar la impedancia acústica entre el agua y los hidrófonos o pequeñas secciones de epoxy o resina que contienen los hidrófonos (hidrófono de arrastre sólido).

Los sistemas acústicos pueden ser diseñados para bajas, medias o altas frecuencias, aunque excepcionalmente estos sistemas pueden combinar varios tipos de hidrófonos que permiten cubrir un rango muy amplio de frecuencias.

Elementos de baja frecuencia: Reciben señales en el rango (aprox. 1Hz a 150Hz y suelen tener como objetivo recibir vocalizaciones de misticetos, que producen vocalizaciones en bajas frecuencias, generalmente no superiores a los 600 Hz. Estos elementos no son muy comunes, puesto que requieren cableados muy largos para reducir la influencia del ruido de la embarcación que predomina a bajas frecuencias y un sistema de arrastre muy estable o estabilizadores activos ya que de lo contrario la señal se ve afectada por la vibración del cable.

Elementos de media frecuencia: entre 20Hz y 20 kHz. Cubren el rango de frecuencias utilizado por la mayoría de los odontocetos (excepto las marsopas y zifios) y la mayoría de vocalizaciones de misticetos (excepto ballena azul y rorcual común)

Elementos de alta frecuencia: Entre 17kHz y 250kHz, optimizados para máxima sensibilidad en el campo ultrasónico, permiten detectar marsopas y zífidos, que vocalizan en rangos de frecuencia muy elevada..

La distancia entre los elementos de una matriz de hidrófonos se define como “apertura” del sistema y es la característica que permite definir la capacidad de localización o precisión angular del sistema. A mayor distancia entre elementos menor precisión pero mayor alcance, a menor distancia entre elementos mayor precisión per menor alcance. Los hidrófonos de arrastre multicanal se diseñan en función de las especies a detectar y localizar, si se trata de cetáceos cuyo radio de detección es corto (ej. marsopas) la apertura optima será menor que si

se trata de un sistema para detectar y localizar delfínidos cuyas vocalizaciones se propagan a mayor distancia. Sistemas de dos canales solo permiten calcular el azimut o ángulo respecto al plano horizontal de la señal detectada. Tres o más hidrófonos permiten calcular el azimut y distancia y por tanto localizar la señal detectada. Los cálculos de azimut y distancia se realizan por el software de procesamiento de señal y es necesario introducir la geometría del sistema (numero de hidrófonos y apertura) en la configuración del programa para que este cálculo pueda realizarse.

Sin embargo, los sistemas de dos canales no son capaces de resolver la ambigüedad de lado, es decir si la detección proviene de la semicircunferencia derecha o izquierda respecto a la dirección de movimiento de la embarcación (ej. Si el azimut es de 36 grados respecto a rumbo no sabemos si corresponde a estribor o babor). La forma tradicional de resolver la ambigüedad es maniobrando la embarcación, virando unos grados hacia uno de los dos lados permite observar si el azimut aumenta o disminuye. Si aumenta indica que la embarcación ha virado hacia el lado opuesto de donde proviene la detección, si el azimut se reduce indica que se ha virado hacia el lado de donde viene la detección. Este tipo de maniobras generalmente solo pueden realizarse desde embarcaciones dedicadas a PAM, ya que las embarcaciones de adquisición sísmica tienen la capacidad de maniobra absolutamente restringida. Por este motivo se tiende a evitar el uso de sistemas de arrastre de dos canales desde embarcaciones de aplicaciones sísmicas.

4.1.2 Sensor de profundidad

El sensor de profundidad es un elemento básico del sistema PAM para poder conocer la profundidad a la que se encuentra el hidrófono y suele situarse al final de la sección. La profundidad podrá leerse en el software apropiado en el ordenador de a bordo. En regiones donde la columna de agua está muy estratificada se utiliza el sensor de profundidad para ubicar los hidrófonos en el canal de sonido profundo (SOFAR) y maximizar el esfuerzo PAM.

4.1.3 Pesos

Se suele añadir peso al sistema de arrastre cuando el sistema permite localización, para mantener la geometría del sistema horizontal con respecto a la superficie del agua. El peso se ubica solo en la parte delantera de la sección de recepción para contrarrestar la tracción oblicua del cable. Es importante que el peso sea específicamente el proporcionado por el fabricante del sistema ya que de lo contrario puede provocar excesiva tracción al cable,

vibración o turbulencias que afectan la calidad de la señal acústica. La velocidad de arrastre determina la cantidad de peso necesaria, a mayor velocidad mayor peso.

4.1.4 Cable de arrastre

El cable de arrastre puede ser de muy diferentes longitudes. En general, cuanto mayor sea la embarcación de arrastre mayor longitud es necesaria para reducir el efecto de ruido y turbulencia generado por la propulsión. y cuando se manda al barco suele venir en un carrete de transporte. Una vez en el barco deberemos desenrollar el carrete y traspasar el cable al winch (cabrestante) de cubierta dedicado a PAM. Para ello deberemos identificar el conector que conecta al cable de cubierta (Figura 4.3) y fijarlo al winch con cinta adhesiva para mantenerlo en el sitio. Operar el winch para enrollar el cable en la dirección correcta, es decir, en la dirección opuesta a la que luego queremos desenrollar. La sección del hidrófono debe quedar en la parte de fuera.

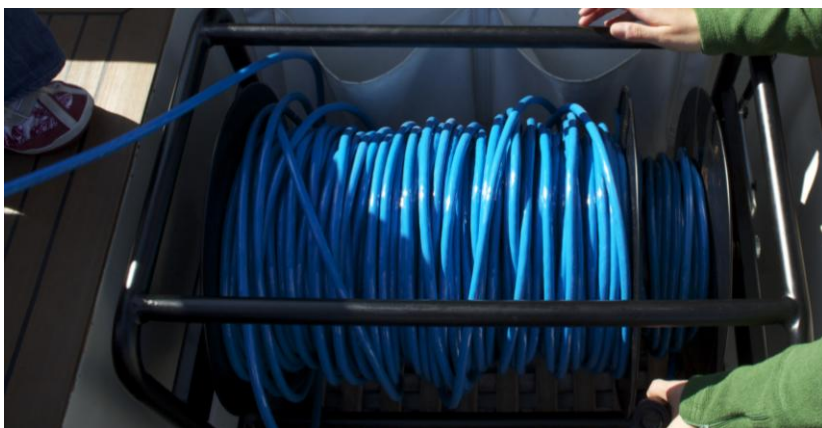


Figura 4.3: Cable de hidrófono enrollado en el carrete de transporte.

Importante: Cuando el winch está operando siempre se debe desconectar el conector del cable de cubierta o se romperá.

4.1.5 Cable de cubierta

Este cable va desde el conector de cubierta, a través de la cubierta hasta el departamento de instrumentación (instrument room), donde estará la estación de proceso PAM..

4.1.6 Unidad de procesado de señal

El cable de cubierta va hasta la unidad de proceso PAM (Figura 4.4). Aquí es donde la señal de los hidrófonos es procesada y separada dependiendo de las especies objetivo y los canales que se estén usando. La unidad de procesado de señal es también la que alimenta los

preamplificadores ubicados en la sección de recepción del sistema. El acondicionado de señal también está en esta unidad.

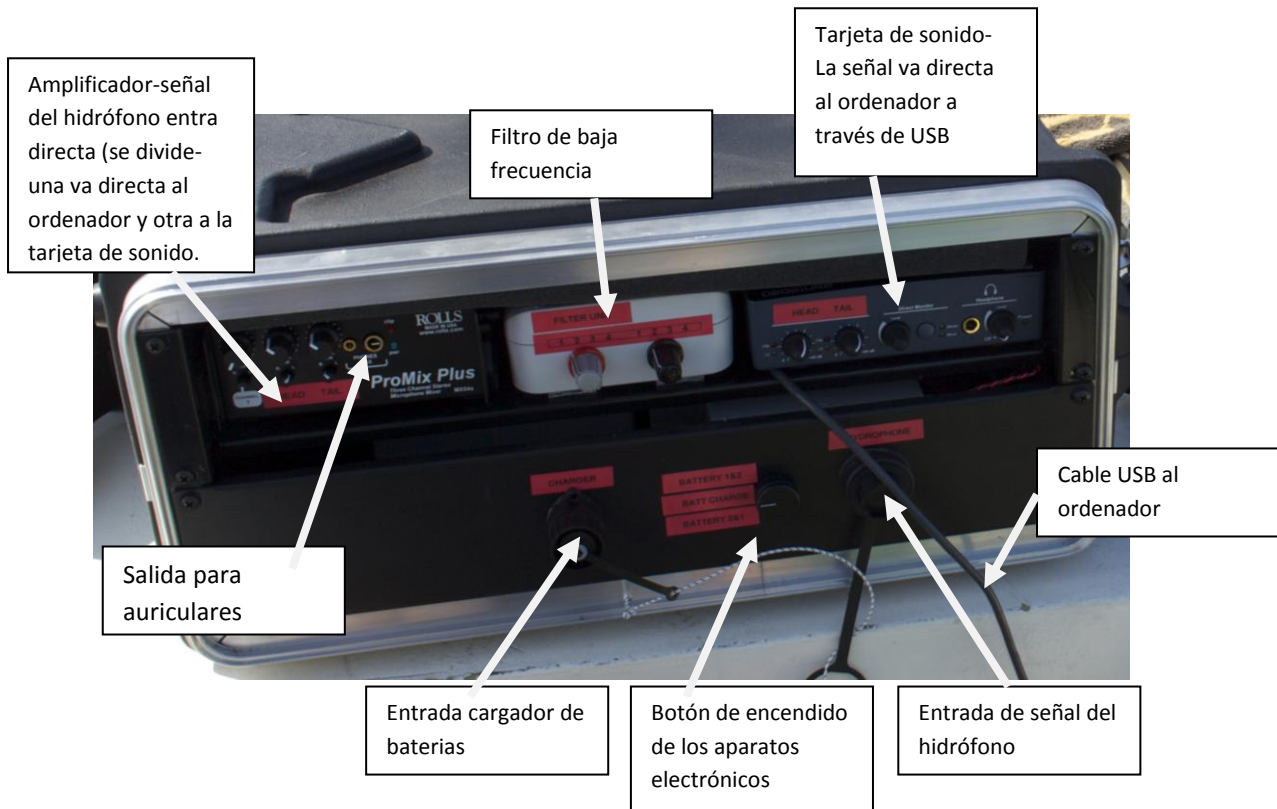


Figura 4.4: Esquema de una unidad de procesado electrónico. Este es solo un ejemplo de un sistema, pero existe una amplia variedad de ellos, que pueden no ser iguales que el ejemplo.

4.1.7 Tarjetas de adquisición

La tarjeta de adquisición es un convertidor de señal analógica a digital. El número de muestras o medidas por segundo se denomina **rango muestral** y se mide en kHz. Cuanto más rápido es el rango de muestreo de la tarjeta de sonido, más precisa será la reconstrucción de la onda y mayor rango de frecuencias será procesado.

Una buena reconstrucción de la señal es posible cuando el rango muestral (o frecuencia) es mayor de dos veces la máxima frecuencia de la señal de interés. Por ejemplo, si una señal tiene

un límite superior de banda de 100 Hz, una frecuencia de muestreo mayor de 200 Hz será la mínima suficiente para una buena reconstrucción.

Un rango muestral común en los equipos es de 48kHz por ser este el rango de muestreo estándar para audio comercial, lo que nos permitirá representar señales analógicas de 24kHz. Dependiendo de nuestras especies objetivo deberemos decidir el rango muestral de la tarjeta de adquisición. Por este motivo las tarjetas de adquisición de los equipos PAM permiten varios rangos muestrales.

4.1.8 Filtros de banda

Es importante confirmar si la tarjeta de adquisición incluye filtros de banda. De ser así estos han de ajustarse en función del rango muestral seleccionado. Los filtros de banda deben eliminar siempre las frecuencias superiores a $\frac{1}{2}$ del rango muestral seleccionado para evitar artefactos durante el proceso de digitalización. Algunos equipos contienen un filtro de banda adicional, previo al digitalizado, para eliminar o atenuar las bajas frecuencias donde se concentra el ruido de vibración del cable y parte del ruido de propulsión de la embarcación.

4.1.9 Auriculares

Debería haber dos pares de auriculares de buena calidad, que permitan escuchar los sonidos que provienen del hidrófono sin que interfiera el ruido ambiente exterior. Estos auriculares deben cubrir todo el pabellón auditivo. Algunos sistemas tienen auriculares inalámbricos y los auriculares se pueden transportar a cierta distancia para poder observar los animales, mientras se realiza la escucha. Auriculares con reducción de ruido son aconsejables.

4.1.10 Ordenadores

Los ordenadores se proveen con el software que va a ser usado por el equipo PAM. El software debe ser instalado específicamente para el equipo acústico que se utiliza para evitar problemas de incompatibilidad de drivers con las tarjetas de adquisición. El proveedor del PAM debe instalar este software y drivers y dejarlo a punto para su uso. En caso de que la estación de procesado sea en una sala cubierta (ej. puente alto), es importante que los ordenadores dispongan de una pantalla de alta luminosidad.

4.2 Despliegue del equipo PAM

En este punto se exponen las técnicas para el despliegue del equipo PAM desde el barco. La forma como se realiza el despliegue del equipo depende de varios factores, el principal dependiendo de si el equipo se despliega desde el barco de apoyo (chase vessel) o desde el barco sísmico (seismic survey vessel).

4.2.1 Despliegue desde el barco de apoyo (chase vessel)

Si el hidrófono se despliega desde el barco de apoyo, la operación es más simple, básicamente porque no hay equipo sísmico que pueda enredarse con nuestro equipo. El cable de arrastre se despliega usando el winch directamente desde la popa. Una ventaja es que puede desplegarse todo el cable (200-250m), reduciendo significativamente el ruido de la embarcación. Sin embargo una desventaja es que la embarcación de apoyo no está suficientemente cerca de los cañones de aire en la embarcación principal para determinar de forma precisa si los animales están dentro de la zona de exclusión. Se debe pedir al barco de apoyo situarse en la mejor posición de forma que pueda realizarse la mitigación para los mamíferos marinos. Un ejemplo es el que se muestra en la Figura 4.5, donde el barco de apoyo se sitúa lo más cercano en la dirección de la embarcación sísmica. Por razones de seguridad el barco de apoyo no puede situarse justo delante del barco sísmico, pero si en el lado de babor o estribor. El barco de apoyo puede tener que atender otras operaciones de seguridad de la embarcación sísmica durante un proceso de mitigación, por lo que si el PAM está operando sin el soporte de un MMO estas operaciones deberán combinarse con las del trabajo del PAM, con el fin de que no quede ninguna operación sin mitigación. Por ejemplo, si durante un proceso de mitigación durante el periodo nocturno o mala visibilidad, previo al inicio del "soft-start", el barco de apoyo debe movilizarse lejos de la zona de exclusión, debido a algún tipo de operación de seguridad, el "soft-start" deberá retrasarse hasta que el barco pueda estar situado cercano a la zona de exclusión.

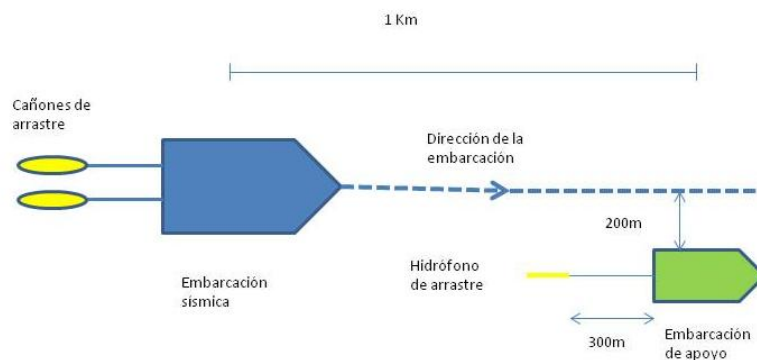


Figura 4.5: Esquema de la situación del barco de apoyo respecto a la embarcación sísmica.

4.2.2 Despliegue desde la embarcación de trabajo sísmico

Este es el método más empleado, debido a que el despliegue desde la propia embarcación generadora de ruido permite controlar mejor la zona de exclusión, aunque se pierde efectividad en la detección de mamíferos marinos por las interferencias con las ondas sísmicas y ruido de propulsión de la embarcación.

A veces este despliegue interfiere con la seguridad del propio sistema de adquisición sísmica y no siempre puede desplegar el equipo con las condiciones perfectas para PAM. Deberá coordinarse con la tripulación cuál es el mejor modo de efectuar esta operación, aunque muchas embarcaciones ya tienen el método establecido y quizás no pueda elegirse.

En general, el proceso PAM se suele realizar con los mismos hidrófonos de arrastre empelados en la adquisición sísmica (“streamers”). En este caso, la señal de algunos de los hidrófonos (generalmente los hidrófonos frontales de los “streamers” mas laterales respecto a la fuente sísmica) es redirigida a una estación de proceso PAM. En este caso la mitigación solo puede realizarse una vez se hayan desplegado los “streamers” y cuando el personal PAM no está involucrado en el despliegue y recogida.

En otros casos, los protocolos de la embarcación de adquisición permiten el despliegue de un hidrófono de arrastre dedicado a PAM, pero esta configuración se desaconseja y debe ser empelada solo en caso de no haber otra alternativa. En la mayoría de los casos la longitud de despliegue está limitada a los primeros 50-100 m para evitar el riesgo de contacto con cableado o estructuras relacionadas con el arrastre de las fuentes sísmicas y los “streamers”. El

despliegue suele hacerse por una de las dos aletas de la embarcación, posicionando el hidrófono de arrastre para PAM entre la popa de la embarcación y las fuentes sísmicas. Esta ubicación compromete la viabilidad de PAM por el volumen al que se reciben los disparos de las fuentes sísmicas (impidiendo la escucha de la señal por el operador) produciendo un enmascaramiento intermitente de la mayoría de la banda de interés en cada disparo de las fuentes sísmicas (generalmente de 1 s cada cada 10-15 s) así como un enmascaramiento continuo de las frecuencias bajas (generalmente los primeros 2 kHz) debido al ruido de la propulsión de la embarcación. Algunos programas disponen de una función que mejora la capacidad de realizar PAM en esta configuración, la señal es procesada previamente a ser escuchada por los auriculares y un filtro de amplitud de energía acústica “gate” bloquea la señal cuando supera un umbral definido por el usuario. Esta función evita exponer al operador a niveles de ruido elevados por los auriculares pero compromete la efectividad de PAM ya que durante el bloqueo de señal no hay posibilidad de detectar ninguna vocalización de mamíferos marinos.

5. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL SOFTWARE DE SEGUIMIENTO ACÚSTICO

Los diferentes tipos de software para PAM, están diseñados para recibir y analizar las señales que provienen del hidrófono, con el fin de obtener un seguimiento acústico en tiempo real.

La señal recibida por el sistema de arrastre, una vez acondicionada y digitalizada, se procesa para generar una figura que representa la distribución de energía acústica y su intensidad en frecuencia y tiempo denominada espectrograma. El espectrograma es una figura dinámica, que de manera continua y a tiempo-real, representa la señal acústica recibida por el sistema de arrastre (Figura 5.1).

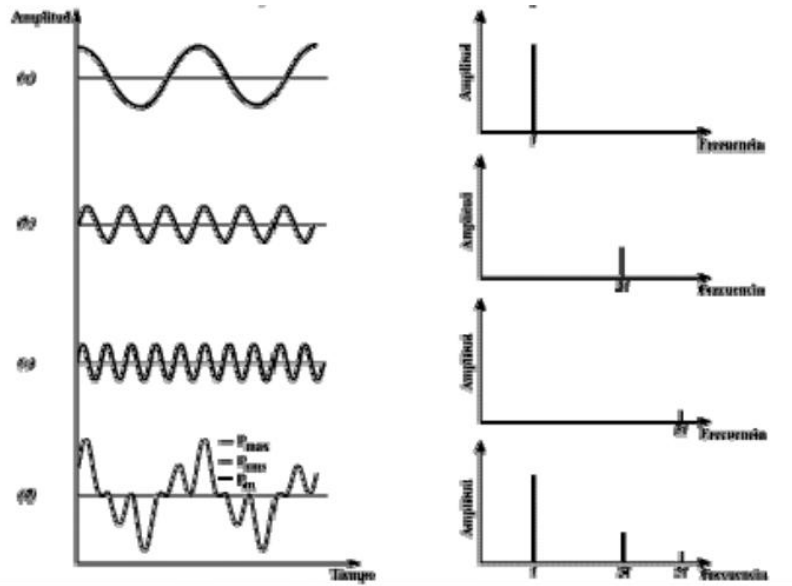


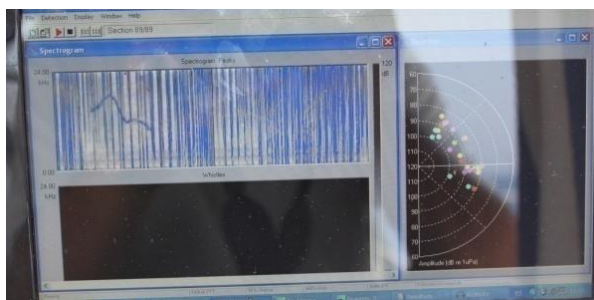
Figura 5.1: Representación de la amplitud de una onda acústica en referencia a su frecuencia. O

Observando la Figura 5.1 vemos a la izquierda la representación de la amplitud (medida en dB generalmente) de una onda respecto al tiempo. La representación de la derecha muestra cuál es la frecuencia en referencia a la amplitud. El último ejemplo (d) es la suma de las ondas a), b) i c)

5.1 El software PAMGUARD

5.1.1 Los principios básicos del software PAM

Existen varios software que permiten realizar el seguimiento acústico de mamíferos marinos, como los desarrollados por International Fund for Animal Welfare (IFAW) para la identificación de los silbidos de delfines (whistle) (Figura 5.2) o los específicos desarrollados para cachalotes (Rainbow Click) (Figura 5.3) o por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), como Ishmael (Figura 5.4). Logger es un software que puede ser utilizado conjuntamente con los programas citados anteriormente, muy útil para las detecciones acústicas.



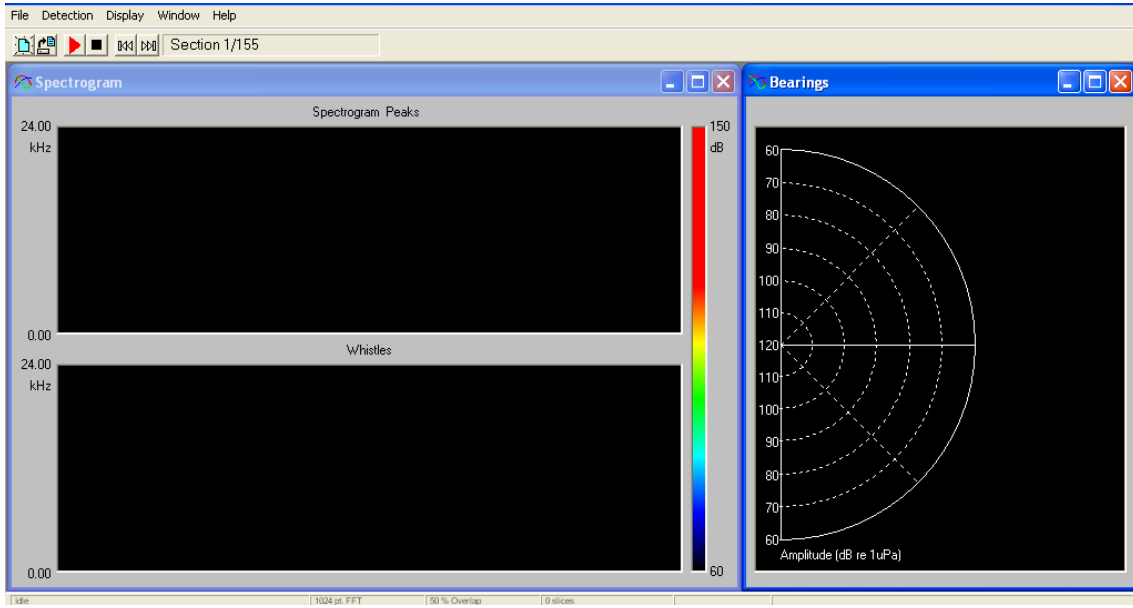


Figura 5.2: Imagen de la interface del programa Whistle con la representación de un silbido de delfín listado reproducido en un ordenador.

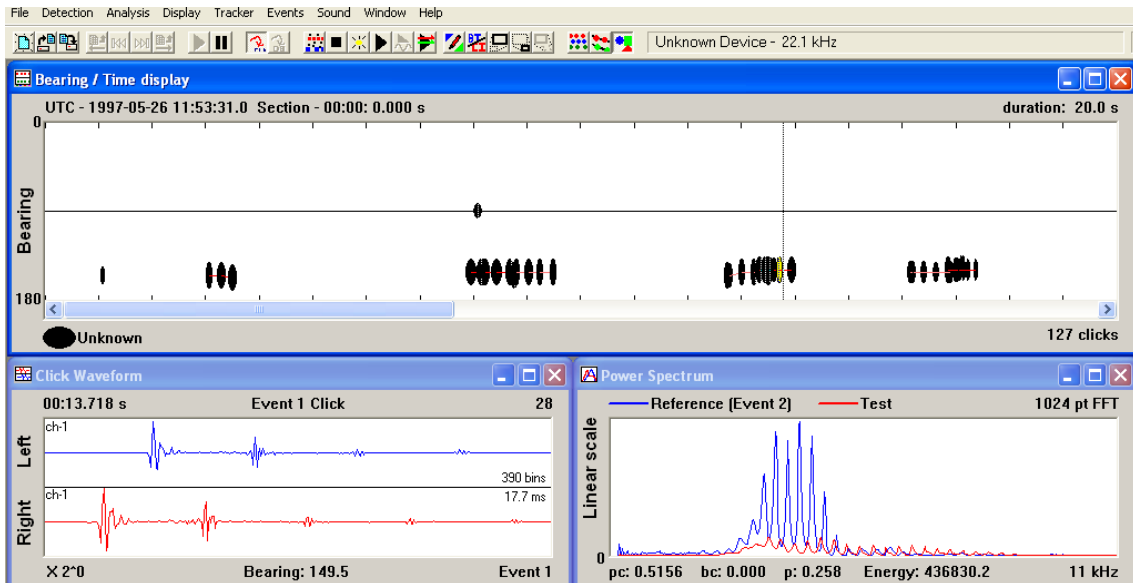


Figura 5.3: Imagen de la interface del programa Rainbow click con la representación de una secuencia de codas de cachalote.

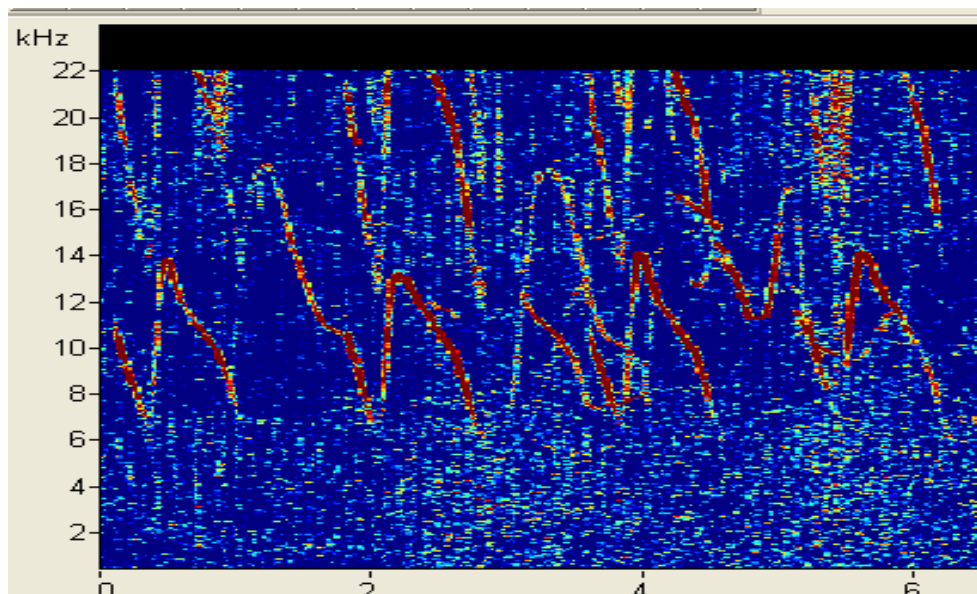


Figura 5.4: Imagen de la interface del programa Ishmael 2.0 con la representación de silbidos de delfines y ruido ambiente.

El software de IFAW (Logger y Rainbow click) puede ser descargado desde <http://www.marineconservationresearch.co.uk/downloads/logger-2000-rainbowclick-software-downloads/>, pero ambos están integrados en la plataforma de PAMGUARD.

Ishmael puede ser descargado en la siguiente página

<http://www.pmel.noaa.gov/vents/acoustics/whales/ishmael/download.html>

5.1.2 Software PAMGUARD

Ya hemos visto algunos ejemplos de software de PAM, utilizado en el seguimiento acústico pasivo, desarrollado por IFAW o por la NOAA. Pero el nuevo software que se utiliza a nivel internacional para el seguimiento acústico es el software PAMGUARD, uno de los más utilizados en la industria off-shore para la mitigación de impactos.

PAMGUARD es un software gratuito y de código abierto. Estos dos factores son cruciales, pues aunque existen otro software gratuito no es fácil acceder al código, por lo que impide a sus usuarios desarrollar y mejorar las capacidades del propio software.

PAMGUARD puede ser descargado en la web www.pamguard.org a través de <https://sourceforge.net/projects/pamguard/>

El proyecto ha sido desarrollado por la Industria del gas y el petróleo, a través de la Asociación Internacional de Productores de gas y petróleo OGP (www.soundandmarinelife.org)

PAMGUARD está desarrollado para funcionar en Windows, Linux y Macintosh. Para asegurar esto, utiliza Java como lenguaje de programación.

Básicamente PAMGUARD crea una interface o un marco de trabajo que permite incorporar módulos de trabajo conjunto, por lo que en lugar de tener abiertos diferentes programas (por ejemplo: Logger, Whistle, Rainbow click o Rainbow click Porpoise) se abre un solo programa y luego se añaden los diferentes módulos que queremos usar. Así podemos crear diferentes proyectos, según el lugar de trabajo o las necesidades que se tengan. Por ejemplo, en el mar del Norte, específicamente la configuración será para la detección de marsopas, pero si estamos en el mar balear, podremos configurar para la detección de cachalotes.

5.1.3 Instalar y abrir PAMGUARD

En primer lugar instalamos PAMGUARD, que encontrareis en el CD del curso, en la carpeta “PAMGUARD SOFTWARE”, dentro de la carpeta PAMGUARD y hacemos doble click en el ejecutable, seleccionamos “next” y luego “install”. Si estamos usando un Mac, abrimos el archivo en la carpeta “PAMGUARD Mac”

Cerramos la ventana del blog de notas, con las especificaciones del programa y abrimos en el menú de inicio PAMGUARDBETA32. Aparecen 2 ventanas, cerramos la que pone “PAMGUARD tip of the day”.

La siguiente ventana nos permite escoger la configuración que queremos abrir. Buscamos en “Browse” en nuestro CD un archivo llamado “blank.psf” en la carpeta de PAMGUARD. De momento crearemos un proyecto en blanco, así que se nos abrirá una ventana en blanco y otra en negro. Esta última es para los creadores del software, en la que se reportan errores. En caso de que tengamos un error persistente, los desarrolladores querrán ver una copia del error en esta ventana. Por el momento la ignoramos.

En la ventana “file” vamos a “Show data model”, que sirve para ver la configuración de un proyecto en específico. En este caso la ventana también está en blanco, puesto que aún no tenemos módulos añadidos.

El siguiente paso es abrir una muestra de configuración. Primero cerramos PAMGUARD y volvemos a abrir y buscamos el archivo “SUBMON_Configuración”, un ejemplo de configuración creado para esta práctica.

Las características de esta configuración contienen:

- **Modulo de mapa (map):** Similar al Logger. Muestra la posición del barco y se pueden añadir mapas de la zona también (Figura 5.5). También muestra la posición de la zona de exclusión y la posición de los cañones de aire. En caso de que exista una detección se mostrará el ángulo a los clicks o silbidos.

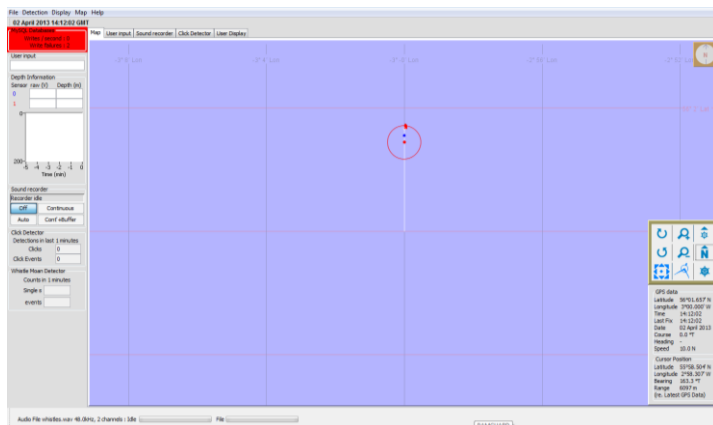


Figura 5.5: Ejemplo de la visualización de la pestaña “map” en el programa PAMGUARD.

- **Comentarios (user input):** Para escribir comentarios, parecido al Logger
- **Modulo de detector de clicks (Click detector):** Parecido al programa Rainbow click
- **Espectrograma** que incorpora “whistle moan detector modules” y “radar bearing” (user display)
- **Un grabador de sonidos (sound recorder)**
- **Modulo lector de profundidad**
- **Base de datos (database module):** similar al programa de logger
- **Módulo de seismic veto:** usado para enmudecer el ruido producido por los cañones de aire cuando se disparan, permitiendo al operador PAM utilizar auriculares y escuchar la señal del hidrófono de arrastre. No visible hasta que se ejecuta una detección. Esta aplicación es importante y debe estar siempre activada cuando la actividad de PAM se realiza en presencia de disparos de cañones de aire.

En general, la configuración de PAMGUARD vendrá dada por el proveedor del equipo acústico, puesto que es necesario poner las características del sistema de hidrófono en la configuración. Sin embargo, podemos necesitar cambiar algunas características específicas del proyecto.

En el archivo “file” – “show data module” podremos ver cuál es la configuración que tenemos en nuestro proyecto cuando estemos a bordo de un barco (Figura 5.6)

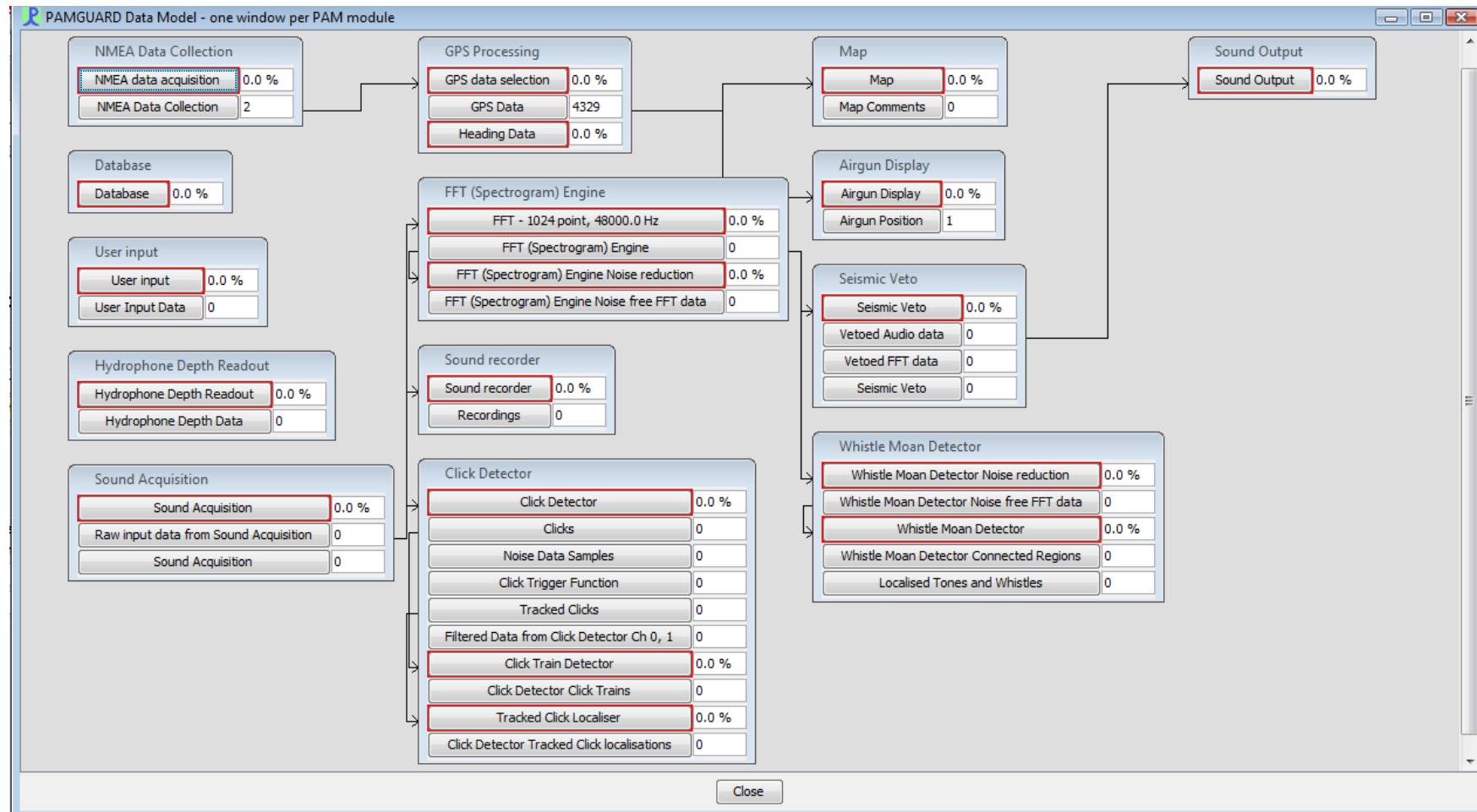


Figura 5.6: Ejemplo de un proyecto de PAMGUARD creado con diferentes módulos

Por ejemplo, si queremos crear nuestro propio proyecto no podemos poner solo un módulo de “**map**”, si no que hay que añadir el módulo de “**NMEA data collection**”, que es la forma a través del cual los instrumentos marítimos y también la mayoría de los receptores GPS pueden comunicarse los unos con los otros. La cadena de datos desde NMEA ha de pasar a través del módulo “**GPS processing**”.

Otros módulos que están ocultos en el marco visible de PAMGUARD, pero que deben ser añadidos son los módulos de detección, como el “**click detector**”, que para que sea funcional debe añadirse el módulo “**sound acquisition**” con el fin de conectar la señal de entrada desde el equipo de PAM al módulo de “**click detector**”. También el módulo “**sound recorder**” debe enlazarse al de “**sound acquisition**” para ser funcional.

Otro ejemplo es el del módulo “**whistle/moan detector**” para el que se necesita adquirir los datos a través del módulo “**FFT (Spectrogram) Engine**”. Este módulo es una herramienta para generar espectrograma desde los datos sin procesar. También el módulo “**seismic veto**” necesita coger los datos desde el módulo “**FFT (Spectrogram) Engine**”. La salida de sonido “**sound outoput**”, puesta después del módulo “**seismic veto**” no permitirá que se oigan las sísmicas, por ejemplo, es la salida de los auriculares.

Todos estos son conceptos que se deben tener en cuenta antes de configurar nuestro propio proyecto y cuando nos encontremos trabajando con un proyecto ya creado.

5.1.4 Ejercicio de configuración de un proyecto PAMGUARD

Vamos a crear ahora una nueva configuración con PAMGUARD.

¡Recordemos ir guardando el ejercicio durante la práctica!

En primer lugar abrimos PAMGUARD y buscamos el archivo “blank.psf” del CD del curso. Cuando hayamos abierto esto, nos vamos a “file” y guardamos “save configuration” como “Ejercicio_clase_PAMGUARD.psf”

Hacemos “clic” sobre “**show data model**” y aparecerá una ventana en gris, sin nada. Luego hacemos “clic” con el botón derecho y en el menú aparecerá “**Add modules**”, donde si clicamos podremos añadir varios módulos, en otro menú que se despliega al lado. Debemos repetir la operación para cada módulo que queramos añadir.

Vamos a repetir la configuración de la Figura 5.6.

IMPORTANTE: Poner primero el módulo de NMEA y el de GPS, antes del de “**airgun display**”, porque si no el programa colapsará.

5.1.4.1 Air gun display

Este es un módulo importante, puesto que nos permite configurar nuestra zona de exclusión y el sistema de despliegue del equipo PAM.

Ir a “Display” en la barra de menú del programa y seleccionar “Airgun display options” y aparecerá la ventana que muestra la Figura 5.7.

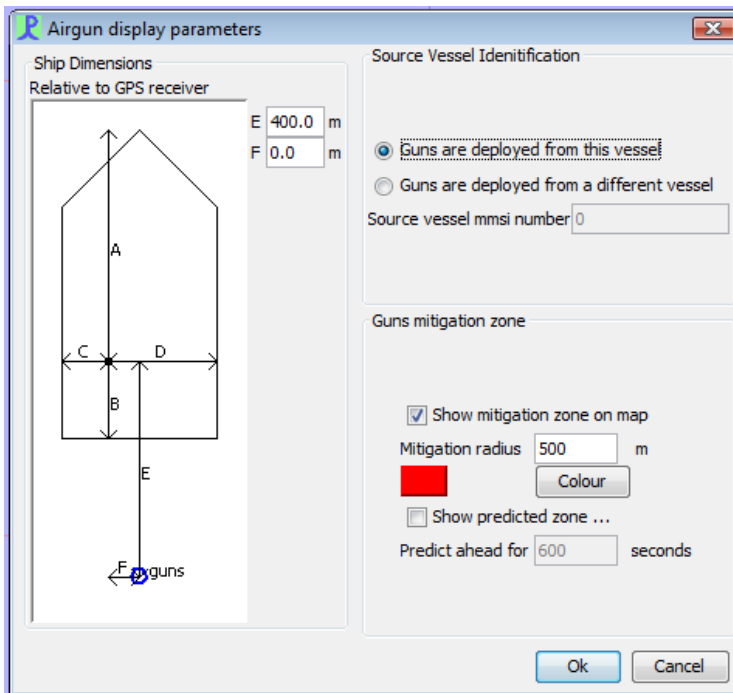


Figura 5.7: Panel de “Airgun display parameters” donde cambiar la configuración del sistema del equipo acústico y de la embarcación.

En “Ship dimensions” podemos entrar la distancia de los cañones de aire al GPS receptor en la casilla “E”. Si los cañones están desplazados podemos añadir esta distancia en la casilla “F”.

La zona de exclusión se introduce en la casilla “Mitigation radius” y el sistema de despliegue en la casilla “Source Vessel identification”.

5.1.4.2 Configuración del GPS

Como ya hemos visto mucha de la configuración de PAMGUARD se basa en distancias, de los hidrófonos a la popa de la embarcación, de la embarcación a nuestra zona de exclusión., por lo que si el GPS está en el medio de la embarcación a 30 metros de la popa, deberemos añadir 30m al largo total de la matriz desplegada del hidrófono para dar la distancia real de la matriz del hidrófono, desde el GPS al barco. (Figura 5.8)

Ir a “Detection”, luego a “GPS” y a “GPS Options” y hacer “clic” en Vessel. Aquí entramos las diferentes distancias en las casillas de la A-D, lo que permiten especificar donde se sitúa nuestro GPS receptor dentro de la embarcación

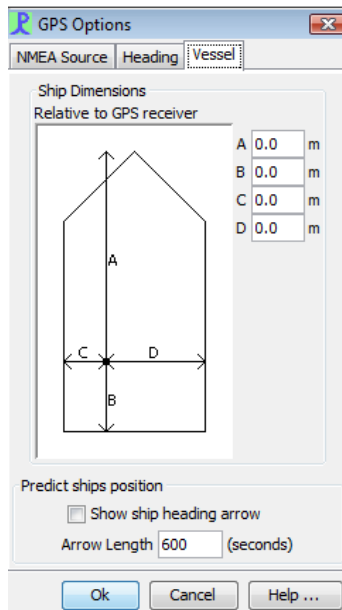


Figura 5.8: Opciones de localización del GPS en referencia a la embarcación.

5.1.4.3 Añadir módulos

Cada vez que añadimos un módulo, veremos que este se visualiza en el panel del programa. También se pueden añadir módulos desde “File” y “add modules” en la ventana del programa, pero es más fácil de comprender si lo hacemos desde la ventana de datos.

Un punto importante es el de crear un panel “**user display panel**” para poder añadir luego el espectrograma y el radar, que no pueden funcionar sin este módulo. Con el botón derecho “**add modules**”, “**displays**” y luego “**user display panel**”. Este no aparece en el modelo de datos, pero estará en la barra de la interface del programa.

Ahora para crear el espectrograma y radar para el ángulo se debe ir a “**User Display**” en la barra de menú y seleccionar las opciones para crear un nuevo espectrograma o una nueva ventana de radar.

Una vez se han añadido todos estos módulos, podemos observar que no todos linkan unos de otros como en el ejemplo que seguimos. Para estos módulos debemos ir a la función de configuración (“**settings**”) para activar los links. Para la mayoría de los módulos, es posible cambiar la configuración con el mouse sobre la parte superior del módulo y con el botón de la derecha sobre la primera línea de la ventana del módulo seleccionado (Figura 5.9). También se puede realizar un cambio en la configuración a través de la barra del menú en la ventana de la interface del programa.

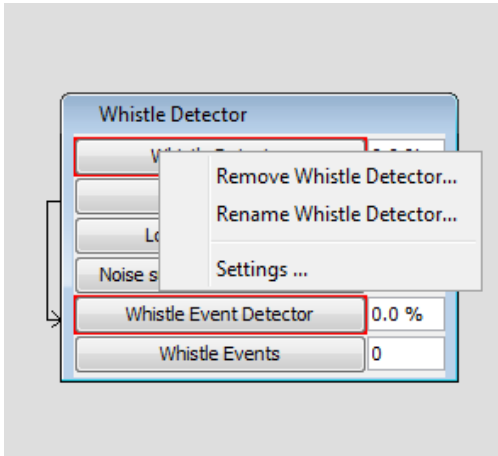


Figura 5.9: Ejemplo de cómo modificar la configuración de los módulos

Los módulos que no se juntan solos con otros módulos son el **“Whistle detector”** y el de **“Seismic Veto”**

- Para **“Whistle detector”** activar el módulo haciendo “clic” encima y con el botón de la derecha sobre la primera línea de la ventana del módulo seleccionado e abre “settings”. Asegurate de que “FFT spectrogram engine” está seleccionado en “source de FFT data”. Después selecciona en Canal 0 y el Canal 1 y OK

Ahora clics en “Noise and Thresholding” arriba de esta ventana y clics las 4 cajas de la página y OK.

Ahora se observa que este módulo pende del módulo FFT Spectrogram engine

- El módulo de **“Seismic Veto”** enmudece el sonido de los cañones de aire en la salida de los auriculares para que nos permita realizar las escuchas. Sin embargo vemos que en el ejemplo no se nos lincka a nada. Necesita una entrada de fuente de sonido. Para que funcione hacemos lo siguiente.

Activamos el módulo de “Seismic Veto” en la ventana del modelo de datos y clicamos botón de la derecha sobre la primera línea para activar las opciones de configuración. Asegurate de que “FFT spectrogram engine” está seleccionado en “source de FFT data”. Después selecciona en Canal 0 y el Canal 1 y OK.

Ahora se observa que este módulo pende del módulo FFT Spectrogram engine

- El módulo “Seismic Veto” enmudece el sonido de los cañones de aire. Sin embargo, para que este módulo pueda ser funcional debe estar enlazado con un módulo de salida de sonido, donde saldrán los auriculares.

Para poder hacer esto activamos el módulo **“sound output”** en la ventana de datos y clicamos con el botón de la derecha sobre la primera línea donde está **“sound output”** para activar la configuración. Asegúrate de que está **“vetoed audio data”** seleccionado en el desplegable dentro de **“data source”** y activa Canal 0 y Canal 1 y OK. Ahora este módulo está conectado al módulo de **“Seismic Veto”** y la señal de salida a auriculares omitirá los disparos de los cañones de aire. En el Bearing-time display, la exclusión de unos instantes de señal (y por tanto la imposibilidad de detectar mamíferos marinos) se representa como un triángulo en la línea de los 0 grados. Aparecerá un triángulo para cada disparo que haya sido enmudecido, en función de la tasa de disparo, la figura presentará más o menos triángulos a mayor o menor distancia entre ellos. Es importante mantener este display activo cuando se configura la función **“Seismic veto”** para confirmar que el enmudecimiento no está comprometiendo la capacidad de detectar señales de mamíferos marinos.

- También enlazaremos el módulo **“sound recorder”** que permitirá grabar el sonido en bruto que proviene del hidrófono, por lo que enlazaremos el módulo **“sound recorder”** al módulo **“sound acquisition”**.

Para poder hacer esto activamos el módulo **“sound recorder”** en la ventana de datos y clicamos con el botón de la derecha sobre la primera línea donde está **“sound recorder”** para activar la configuración.

Asegurate de que **“Raw input data from sound acquisition”** está seleccionado en **“Raw Data Source”** y clicas OK. También se podría grabar el sonido después de aplicar el **“Seismic Veto”**. Para ello hay que seleccionar **“vetoed audio data”** en **“Raw Data Source”**. Si se hace esto se observará que el módulo de **“sound recorder”** se enlaza con el de **“seismic veto”**. En esta configuración, la grabación de la señal del hidrófono de arrastre excluye los disparos de los cañones de aire ya que la aplicación **“Seismic Veto”** filtra la señal grabada.

5.1.4.4 El Interface del programa

Ahora que ya tenemos los módulos vamos al Interface del programa. Aquí es donde tendremos el mapa conjuntamente con una línea de tabuladores.

Añadimos el Espectrograma y el radar (bearing screen) al panel “User Display”

Para crear el espectrograma y radar para el ángulo se debe ir a **“User Display”** en la barra de menú y seleccionar las opciones para crear un nuevo espectrograma o una nueva ventana de radar.

Configuración de Radar (bearings): Vamos a **“User Display”** y desplegamos la ventana y clicamos en **“New Radar”** y aparece una ventana (Figura 5.10). Abrimos **“Scales”**, donde se puede cambiar la configuración de la pantalla del radar y la amplitud. Seleccionamos **right half** y la amplitud de la escala pondremos 250 para el máximo y 100 para el mínimo. Luego nos vamos a **“detectors”** y seleccionamos lo que queremos ver en la pantalla del radar, como por ejemplo todos los tonos y silbidos y clicks. Debemos poner cuantos segundos queremos

mantener los clicks o silbidos en la pantalla, si lo dejamos a 0 no veremos nada! Podemos poner 10 segundos. Aceptamos cambios.

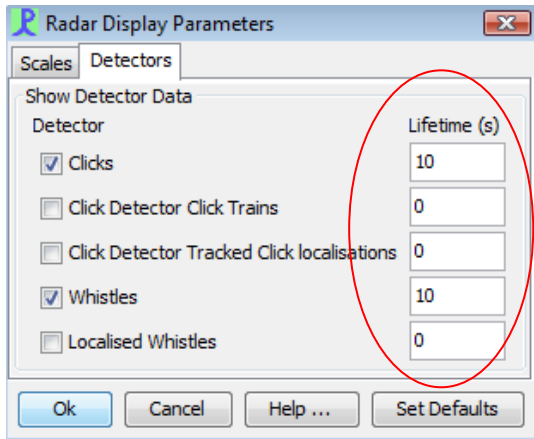


Figura5.10: Panel de configuración del los parámetros del radar

Configuración del espectrograma: Vamos al panel de espectrograma y con el botón derecho seleccionamos “settings”. Aquí entramos en el “Panel 0-Canal 0 y en el Panel 1- Canal 1”.

En “scales” podemos cambiar el color del espectrograma, desde gris a “hot multi-coulored”. También aquí podemos cambiar la escala de dB, como en el módulo de Whistle (ponemos 150 para el máximo y 90para el mínimo)

5.1.4.5 Reproducir archivos de muestra en el software de PAMGUARD

En el CD del curso tenemos muestras de diferentes archivos en la carpeta que se llama “PAMGUARD Tutorial Sample files”. Para poder abrir un archivo hacemos lo siguiente:

Vamos a “Detection”, luego “Sound Acquisition”. Donde pone “Data Source Type” seleccionamos “Audio file”. En la siguiente sección, donde pone “Select sound file” buscamos en “Browse” el archivo del CD y clicamos OK.

Luego en “Detection” arriba de la barra de menú seleccionamos “start” para empezar la reproducción.

5.1.4.6 Configuración del PAMGUARD para un proyecto

Aunque en general la configuración del software de PAMGUARD nos vendrá dada por el proveedor, hay algunas cosas que deberemos completar antes de empezar a usarlo.

Configuración de la matriz del hidrófono: La configuración del hidrófono se encuentra en “file” y en “hydrophone array”. Aquí podemos encontrar información como el número de

hidrófonos, las distancias de separación entre elementos, la sensibilidad o la ganancia que necesitan ser incorporadas. Esto debería estar puesto por el proveedor.

Como PAM necesitaremos incluir las distancias de la sección de la matriz del hidrófono con el fin de entrar la distancia desde la popa de nuestro hidrófono hasta el GPS. Recordemos que si tenemos dos elementos de hidrófonos, el 0 es la parte frontal y 1 es el de detrás, es decir el más lejano. Así que si entramos, por ejemplo 130 metros desde el final de la matriz de hidrófonos hasta el GPS y los hidrófonos están separados entre ellos 3 metros, deberemos hacer lo siguiente:

Ir a “file” y seleccionar “Hydrophone Array” (Figura 5.11)

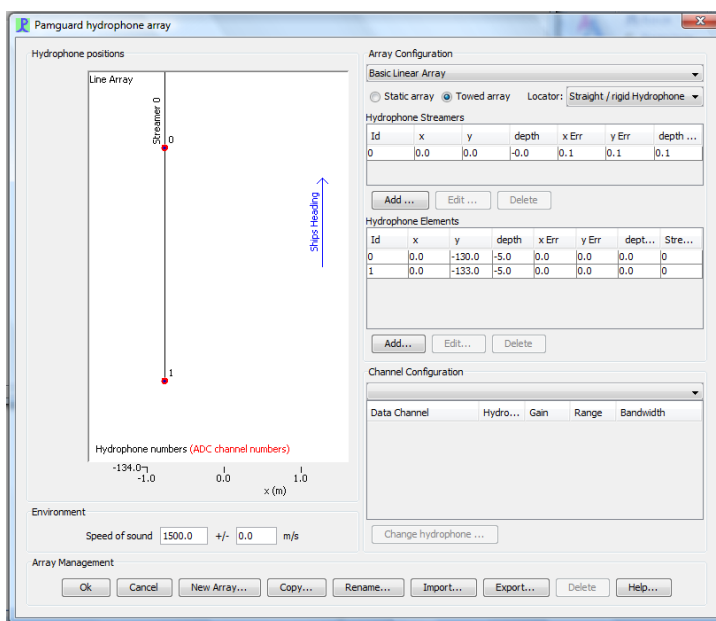


Figura 5.11: Ejemplo de la configuración de la matriz del hidrófono

Activar en Hydrophone elements la casilla “0”, donde pone “Id” (debería volverse azul). Clicamos en el botón Edit y aquí podemos cambiar nuestra configuración. Ponemos en y -130.0. Después hacemos lo mismo para el hidrófono “1” y ponemos -133.0.

Para ver la posición de los hidrófono en el mapa, vamos a “Map” en la barra de menú y seleccionamos “Map options” y clicamos en la caja “show hydrophones”.

La base de datos: Cuando abrimos PAMGUARD debemos decirle que debe poner los datos en la base de datos que se nos ha dado. Para ello debemos hacer lo siguiente:

Ir a “file” y seleccionar “Database Selection” y aparece la siguiente ventana (Figura 5.12).

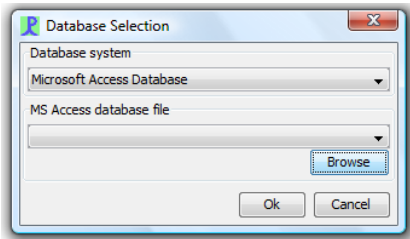


Figura 5.12: Ejemplo de la configuración de la base de datos

Buscamos en “browse” nuestra base de datos y luego le damos a OK.

El módulo de “**seismic veto**” también puede necesitar ser configurado. Vamos a “Detection” y a “Seismic veto parameters” (Figura 5.13)

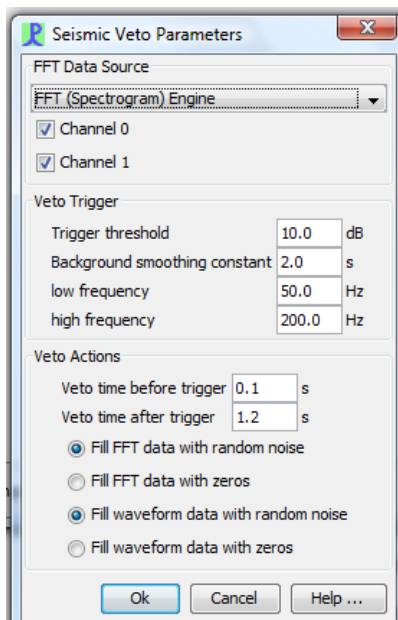


Figura 5.13: Ejemplo de la configuración de los parámetros de “Seismic Veto”

El tiempo para vetar los disparos debe ser ajustado para adaptarse a cada situación en particular. Los umbrales se pueden cambiar en la sección de disparo (veto Trigger).

Recordar guardar siempre una copia del proyecto. Cuando abrimos PAMGUARD debemos ir a buscar nuestra configuración la primera vez. Después esta ya sale por defecto, pero puede no aparecer si el software bloquea el PC y deberá ser re-abierto. Podemos usar los archivos de ayuda para solucionar posibles problemas o dudas que tengamos durante su aplicación.

Además PAMGUARD puede ayudarnos si vamos a la web www.pamguard.org a través del servicio de apoyo. Existe una lista de mail de usuarios de PAMGUARD que puede encontrarse en la web <http://www.pamguard.org/contact.shtml>



6. BIBLIOGRAFIA

Castro P y Huber ME, Marine Biology 3rd Edition, Mc Graw Hill Ed.

Colladon, J. D.; and J. K. E Sturm, "The Compression of Liquids" (in French), Ann. Chim. Phys. Series 2(36), part IV, "Speed of Sound in Liquids," 236-57 (1827).

MAGRAMA (2012) Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente - Documento técnico sobre impactos y mitigación de la contaminación acústica marina. Madrid. 143 pp.

Medwin, H (1975). "Speed of sound in water: a simple equation for realistic parameters," J. Acoust. Soc. Am. 58, 1318-19.

Medwin H. y Clay C. S. (1998) Fundamentals of Acoustical Oceanography. Ed. Academic Press. ISBN 0-12-487570-X

Whitlow W. L. A. y Hastings M. C (2008). Principles of Marine Bioacoustics. Ed. Springer. ISBN: 978-0-387-78364-2

7. ENLACES DE INTERÉS

Organizaciones que abastecen de sistemas de seguimiento acústico pasivo

Ecologic/Vaishing Point

<http://www.ecologicuk.co.uk/Equipment.htm>

Seiche Measurements Ltd

<http://www.seiche.eu.com/>

SeaMap

<http://www.seamap.com/>

Acoustic Monitoring Systems

<http://www.acousticmarinesystems.com/>

Subacoustech LTd

<http://www.subacoustech.com/>

MSeis Ltd

<http://www.mseis.com/services/pam/>

Ocean Science Consulting

<http://www.osc.co.uk/services.php>

Gardline

<http://www1.gardline.com/>

Sonardyne

<http://www.sonardyne.com/products.html>



Páginas webs acerca de bioacústica de cetáceos

Bioacoustics Research Program

<http://www.birds.cornell.edu/brp/>

NOAA

<http://www.pmel.noaa.gov/vents/acoustics.html>

U.S National Marine Fisheries Service-Acoustic Program

<http://www.nmfs.noaa.gov/pr/acoustics>

Cetacean Research Technology

<http://cet.usd.edu/>

Sons de mar

<http://www.sonsdemar.eu/>

Cetacean Research Technology

<http://www.cetaceanresearch.com/education/>

Whale Acoustics

<http://www.whaleacoustics.com/>

Discovery of Sounds in the Sea

<http://www.dosits.org/>

Acoustic Ecology

<http://www.acousticecology.org/>

Oceans Acoustic Lab- University of Washington

<http://acoustics.whoi.edu/>

Sea Mammal Research Unit

<http://www.smru.st-andrews.ac.uk/>

International Bioacoustics Council

<http://www.ibac.info/index.html>

Whale Song

<http://www.whalesong.net>