

# CÓMO UTILIZAR EL CANTO DE LAS BALLENAS PARA SABER SU NÚMERO

How to use the whales sounds to evaluate its population

Rocío PRIETO GONZÁLEZ<sup>1,2</sup>, María Cruz VALSERO BLANCO<sup>1</sup> y Olivier ADAM<sup>2</sup>

## Resumen

En este artículo desarrollamos un modelo para estimar la densidad de población en cetáceos utilizando acústica pasiva. Se introduce el problema biológico y se presenta el proyecto: poder estimar el tamaño de un grupo de cetáceos conociendo los sonidos que emiten. Se hace una recopilación de las técnicas más utilizadas y un balance de la información que aporta a mayores la acústica. El método es ilustrado en un caso práctico, calcular la abundancia de ballena Azul Antártica en los alrededores del Archipiélago Crozet, valiéndonos de los sonidos detectados por un solo hidrófono desde abril 2003 a marzo 2004.

**Palabras clave:** Densidad de población, cetáceos, proceso de Poisson, acústica pasiva.

## Abstract

In this paper we present a model to estimate population densities of whales by means of passive acoustics. We describe here the most frequently used technics and we do a balance of the added information coming from acoustics. We illustrate our method with a practical case: to compute the abundance of blue Antarctic whales around Crozet islands. We use for this a single hydrophone record from April 2003 to March 2004.

**Key words:** population density, marine mammals, Poisson's process, passive acoustics.

---

<sup>1</sup> Universidad de Valladolid, Dto. de Estadística e Investigación Operativa, Valladolid, España.

<sup>2</sup> Centre de Neurosciences de Paris Sud, CNPS-CNRS UMR8195 Université Paris 11, Orsay Cedex, France.  
([rocio.prieto-gonzalez@u-psud.fr](mailto:rocio.prieto-gonzalez@u-psud.fr))



Figura 1: Aleta caudal de una ballena Jorobada (*Megaptera novaeangliae*)

## 1. Introducción

Los cetáceos constituyen un elemento esencial de los ecosistemas marinos. Actualmente la mayoría de las especies de grandes cetáceos se consideran en peligro de extinción y están protegidos por un acuerdo internacional. La estimación de la densidad, el número de individuos por unidad de superficie, o abundancia, la estimación del tamaño de la población, son un requisito fundamental para la adecuada gestión y evaluación del impacto de las poblaciones de cetáceos. Sin embargo, hay ciertas especies de cetáceos que son difíciles de estudiar, ya que viven en pequeños grupos en grandes áreas del océano y pasan casi todo su tiempo bajo el agua. Hacer una estimación precisa de las poblaciones mundiales de ballenas sigue siendo un problema difícil que debe de ser abordado con técnicas complementarias para tener éxito. En este artículo se presenta por primera vez el enfoque basado en la distribución del número de cetáceos.

Actualmente existen tres formas de observar los cetáceos. Mediante métodos visuales, a través de sensores y con la acústica. Los métodos visuales son los más comunes, desde un barco, una plataforma, con prismáticos, vídeos, infra-rojos para detectar la diferencia de temperatura entre la superficie y la corporal del cetáceo. Esto nos permite

hacer foto-identificación de individuos, dar estimaciones del tamaño del grupo o analizar su comportamiento entre otras cosas. Los sensores suelen ser biopsias, a través de las cuales podemos analizar el ADN y obtener información genética, o Tag's, que son dispositivos que se incorporan al animal y nos envían la información, en función de lo que hayan sido programados, vía satélite. Es así como se siguen las migraciones de las ballenas, ya que cada vez que ésta sale a respirar obtenemos su posición GPS. También nos permiten caracterizar el medio (temperatura, salinidad, profundidad), o ver comportamientos individuales. Estos métodos tienen dos inconvenientes, su alto coste material y que sólo pueden ser llevados a cabo por especialistas.



Figura 1.1: Grupo de delfines mulares (*Tursiops truncatus*)

Este proyecto consiste en realizar un estudio formal de los sonidos emitidos por cetáceos mediante modelos matemáticos y estadísticos que a su vez permitan calcular el número o tipo de focos emisores de un conjunto total. Es un campo de trabajo en el que se entremezclan, la teoría de la señal, la matemática pura, la estadística, y que además precisa de una cantidad importante de medios técnicos, informáticos y electrónicos.

El trabajo global se articula en dos ejes. El primero consiste en efectuar modelizaciones matemáticas de los sonidos emitidos por un cetáceo. La segunda tarea es la utilización de las modelizaciones, obtenidas en la etapa precedente, para estimar la densidad de individuos que forman un sistema emisor a partir de los sonidos detectados.

El modelo que se presenta para estimar poblaciones de cetáceos ha sido ajustado utilizando datos provenientes de acústica pasiva. Hasta la fecha, no se ha propuesto ningún método que pueda ser utilizado en general para estimar la densidad de cetáceos a partir de dispositivos acústicos fijos.

Para llevar a cabo este proyecto se ha formado una colaboración entre la Universidad de Valladolid, España y la Universidad Paris Sud 11, Francia. Mediante una tesis en cotutela dirigida por el catedrático Olivier Adam, perteneciente al equipo de Comunicaciones Acústicas CNPS UMR 8195 (<http://www.cb.u-psud.fr/>) de la Universidad Paris 11 y María Cruz Valsero Blanco, profesora titular del departamento de Estadística e Investigación Operativa de la Universidad de Valladolid.

El grupo de Comunicaciones Acústicas del Centro de Neurociencias de la Universidad de Paris-Sud 11 (CNPS) mantiene relaciones con la Universidad des Antilles y de la Guayane, en Guadeloupe, que permitirán abordar en breve, la toma de sonidos emitidos por cachalotes, delfines, zifio común y ballenas jorobada, en las aguas del Caribe. Allí la doctorando Nadège Gandilhon, presidente de la asociación BREACH (<http://www.breach-asso.org>) trabaja en una tesis de cetología. BREACH es una organiza-



Figura 1.2: Logo BREACH

ción sin ánimo de lucro con sede en el Mediterráneo (Golfo du Lion), en Guadeloupe (Antillas francesas) y en Córcega y con centro nacional en Toulouse. Su objetivo es la protección, el conocimiento y estudio de los mamíferos marinos. Se llevan a cabo dos misiones al año, campañas de toma de datos en mar, cuyo objetivo es la distribución y abundancia de mamíferos

marinos en las aguas de Guadeloupe.

La educación para la conservación de las ballenas y los delfines es un eje importante para BREACH, quien desempeña acciones didácticas sostenidas por las autoridades regionales, especialmente en Guadeloupe, FWI (Region Guadeloupe, DIREN Guadeloupe).



Figura 1.3: Mon école, ma baleine

Una página pedagógica sobre los cetáceos en Guadeloupe es: (<http://www.ecolebaleine.org/>) “Mon école, ma baleine.” Dirigida por Nelly Pelisson quien a través de actividades interactivas trata de sensibilizar tanto a pequeños como a grandes. En ella podemos encontrar juegos para todas las edades, a partir de 3 años... ¡hasta los 97!,

burbujas de ciencias para desarrollar conocimientos científicos sobre los cetáceos, historias, cuentos y también podemos seguir la actualidad con las informaciones del mes.

También se trabaja en colaboración con Laurent Bouveret animador de la asociación OMMAG, (Observatorio de Mamíferos Marinos del Archipiélago de Guadeloupe) (<http://www.ommag.org>) encargado de recoger, contabilizar, clasificar y analizar las observaciones de cetáceos producidas. Estas sirven para precisar la abundancia y la distribución de una veintena de especies que frecuentan el archipiélago. Contribuyen al censo de ballenas Jorobadas gracias a la foto identificación de su aleta caudal, o al seguimiento muy cercano de familias de delfines residentes.



Figura 1.4: Logo L'OMMAG

Así por ejemplo en esta foto podemos identificar a dos delfines mulares (*Tursiops truncatus*) de un grupo residente en las aguas de Guadeloupe. Saltando más alto "Rocío" nacido en agosto 2009 junto a su madre "Tache Noire".



Figura 1.4: Dos delfines mulares saltando (TT)

## 2. Importancia del estudio

Los expertos en ballenas reconocen por lo general un total de 81 especies diferentes aunque aún se están descubriendo otras nuevas. A pesar de todas las nuevas informaciones, sabemos aún muy poco de la gran mayoría de especies de cetáceos. Conocemos lo suficiente para empezar a plantear las preguntas adecuadas, pero cuanto más profundizamos en ello, más nos damos cuenta de todo lo que nos queda por aprender.

El problema es que estos animales son muy difíciles de estudiar. Suelen vivir en zonas remotas de alta mar y pasan buena parte de sus vidas bajo el agua, mostrándose muy poco cuando salen a respirar a la superficie. Por ejemplo, en 1986 se descubrió un cráneo extraño en las islas Juan Fernández, frente a la costa de Chile. Tras casi una década de observación y difusión científica un equipo de expertos ha llegado a la conclusión de que ese descubrimiento es nuevo para la ciencia. En el 96 se bautizó la especie como zifio de Bahamonde. Y aunque se cree que existen actualmente, aún no se han visto ejemplares vivos de este animal.

Desde sus inicios hace 1000 años, la industria ballenera ha tenido una larga y tortuosa historia. Sus orígenes no están registrados, pero el primer comercio a gran escala de ballenas fue seguramente en las costas de Francia y España. Hacia el año 1200 se cazaban ballenas francas en el golfo de Vizcaya y se había hallado un mercado para casi todas sus partes, incluyendo los excrementos, usados para fabricar un tinte rojo. A inicios del siglo XVII Gran Bretaña, Holanda y otros países se habían dado cuenta del gran potencial de los cetáceos y ya competían por controlar las zonas más productivas. Y en 1640 la industria norteamericana se unió a ellos. A mediados del siglo XIX comenzó la industria ballenera moderna, cuando Svend Foyn desarrolló un arpón explosivo que podía ser disparado desde un cañón de proa. Los adelantos técnicos en los balleneros y sus métodos de caza fueron nefastos para los cetáceos del planeta, ya que supusieron un aumento considerable en el número de presas: Casi un millón de Cachalotes, como mínimo medio millón de rorcuales, más de 350.000 ballenas Azules, casi un cuarto de millón de ballenas Jorobadas y cientos de miles de otras especies. Actualmente se estima que las poblaciones de ballenas se han visto reducidas a menos del 10% de su tamaño original. Según iba disminuyendo su número, la industria ballenera se vio amenazada, pero no fue hasta el siglo XX que los balleneros comprendieron que su propia supervivencia dependía del número de ballenas disponibles. En 1931 se creó la Convención para la Regu-

lación de las ballenas y en 1946 la Comisión Internacional de las Ballenas (IWC) donde sus representantes se reúnen cada año para regular el tema de los cetáceos desde esa fecha. En 1982 se votó una moratoria indefinida para la industria ballenera, aunque el tratado dejaba muchos cabos sueltos y en 1994 aprobaron el santuario de ballenas del Océano Antártico. Cada año la IWC le pide a los científicos información acerca de los censos de poblaciones de cetáceos ya que debido al medio en que viven, el agua, tanto la recopilación de información sobre las distintas especies, como la estimación de su número es una tarea complicada.

Este es el objetivo del artículo.

### 3. Estimación de densidad de población en cetáceos

#### 3.1. Mediante técnicas visuales

Evaluar el tamaño de las poblaciones de cetáceos en mar abierto se ha basado tradicionalmente sólo en técnicas visuales. A continuación se presentan tres de los métodos más utilizados.

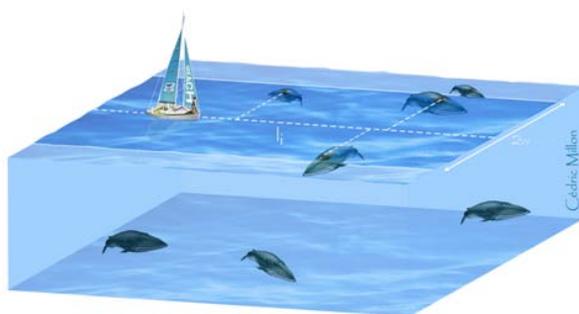


Figura 3.1.1: Strip transect

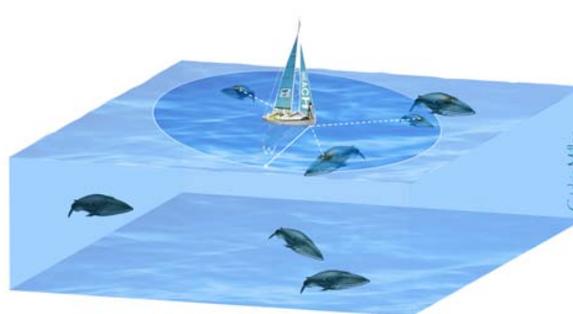


Figura 3.1.2: Circular plot

#### *Los Censos*

Es el método más simple, consiste en contar los individuos presentes en una superficie fijada. La hipótesis más importante pero a menudo omitida es que todos los individuos presentes son contados. Lo que hace que sea raramente respetada. La densidad viene dada por el número de individuos dividido por el área de la zona de estudio. El protocolo es muy sencillo tanto en la técnica como en la metodología, pero este método sólo

es posible para pequeñas poblaciones, con individuos estáticos y fáciles de detectar. Totalmente en contra de nuestros intereses. En general el muestreo se realiza de dos formas diferentes. El *strip transect* (superficie rectangular) y el *circular plot* (superficie circular).

Para extrapolar los resultados obtenidos las líneas o puntos de la zona deben ser elegidos aleatoriamente. El mayor problema de este método es que la detección de individuos suele ser variable y probablemente inferior al 100%.

### *Distance Sampling*

El método *Distance Sampling* es una extensión de los métodos quadrat sampling en el cual se relaja la hipótesis de que todos los individuos sean detectados. Para ello se añade una probabilidad de detección. El protocolo consiste en recorrer un trayecto o quedarse en un punto fijo y tomar la distancia a la que se encuentran los cetáceos observados.

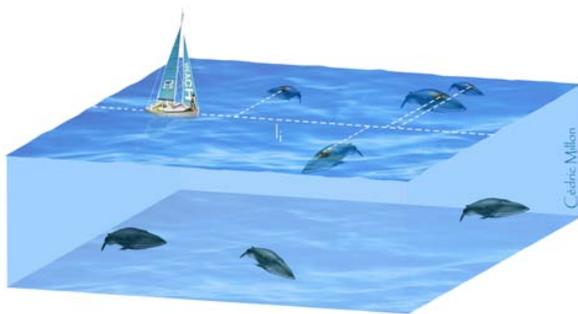


Figura 3.1.3: Line-transect sampling

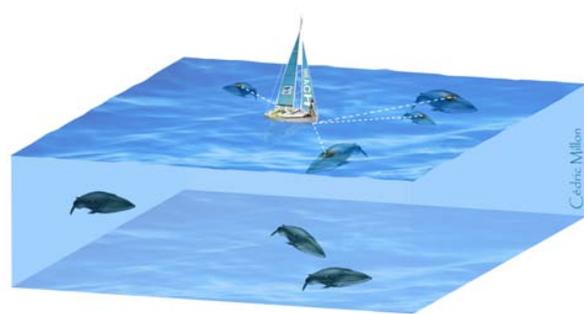


Figura 3.1.5: Point-transect sampling

Las distancias de observación recogidas se utilizan como los índices de detectabilidad. Y el eje central sobre el que se apoya este método es la estimación de la función de detección. Se define una distancia de truncatura y los animales que se encuentran a una distancia superior se supone que no van a ser detectados. Las hipótesis impuestas son tres:

1. Los individuos sobre la línea o sobre el punto son siempre detectados.
2. Los individuos son detectados en su posición inicial, antes de que se produzca ningún desplazamiento en respuesta al observador.

### 3. Las distancias son medidas con precisión y sin sesgo.

Las hipótesis subyacentes al modelo son difíciles de respetar. El punto más crítico es la primera hipótesis. Los animales que se encuentran en la línea pueden no ser vistos por dos razones:

- Se encuentran bajo el agua. Sesgo de disponibilidad.
- Los observadores no han podido detectarlos aunque estén visualmente disponibles, es decir, en la superficie. Sesgo de percepción.

También hace falta tener en cuenta el proceso de detección. Si los grandes cetáceos bucean en aguas poco profundas se puede reducir el sesgo de disponibilidad teniendo una plataforma de observación suficientemente elevada a una altura sobre el nivel del mar o recorriendo las líneas con una aeronave. En cambio el sesgo de percepción es un error que está sujeto al individuo.

Además las hipótesis 2 y 3, en el caso de los cetáceos son raramente respetadas. Los individuos cuando son detectados no deben desplazarse como respuesta al observador, pero dependiendo de la especie obtenemos comportamientos distintos. Algunos cetáceos interaccionan negativamente rehuyendo el acercamiento como los zifios (*Ziphiidae*) que suelen ser animales esquivos que evitan el acercamiento a los barcos y sus avistamientos son ocasionales. El delfín mular (*Tursiops truncatus*) en cambio, suele reaccionar positivamente favoreciendo la interacción con los humanos. La hipótesis 3, podemos suponerla cierta si fijamos unas condiciones óptimas de la meteorología en el mar para llevar a cabo las observaciones. De esta manera y con unos instrumentos apropiados las distancias pueden ser medidas correctamente.

Otro problema es que se necesitan al menos 60-80 observaciones para modelizar la función de detección y proporcionar resultados robustos, y aplicado a los mamíferos marinos obtenerlas es muy poco verosímil. Un claro indicativo es que los artículos que son publicados en cetología, lo hacen a partir de unas 20 observaciones.

### *Captura-Marcaje-Recaptura (CMR)*

Este método consiste en capturar a los individuos, marcarlos y volverlos a soltar. Dichas acciones se repiten durante varias sesiones sucesivas, teniendo en cuenta los individuos que ya han sido marcados en una anterior vez. Se imponen como hipótesis:

1. Todos los individuos son capturados de la misma manera.
2. Las capturas sucesivas son sucesos independientes.
3. Las capturas de los individuos son también independientes.

Son unos métodos bastante robustos. Además se pueden estimar otros parámetros tales como la supervivencia, la tasa de natalidad, las tasas de transición entre diferentes hábitats, la edad en la primera reproducción o el tiempo de estancia.

Con los cetáceos (como no es posible capturarles y marcarles con tanta facilidad como con otras especies animales) se utiliza la foto identificación que consiste en tomar las manchas, heridas o cicatrices distintivas que poseen, como marcas.

Así por ejemplo en la ballena Jorobada (*Megaptera novaeangliae*), también llamada Jibarte, la forma de su aleta caudal, la ondulación, las marcas negras y blancas y las cicatrices, permiten la identificación de los individuos como si de una huella digital se tratara.

La ballena Jorobada, realiza las migraciones más largas de todos los mamíferos (un récord que antes se creía en posesión de una ballena Gris –*Eschrichtius robustus*–). Se observó un Jibarte en sus zonas de alimentación junto a la península Antártica y cinco meses después fue visto de nuevo frente a las costas de Colombia. Siendo la distancia a nado más corta entre ambos lugares de 8334 km. Gracias a estas técnicas es posible la identificación de los individuos y su seguimiento.



Figura 3.1.5: Aleta caudal de una ballena Jorobada. (Mn)



Figura 3.1.6: Foto-Id. Aleta caudal de Mn.



Figura 3.1.7: Foto-Id. Aleta caudal de Mn.

Los métodos visuales de estimación de densidad que hemos visto funcionan bien en especies terrestres, pero en nuestro caso aplicado a los cetáceos no, pues estos pasan gran parte de su tiempo bajo el agua, lo que dificulta su detección. Por ejemplo, se cree que el Cachalote (*Physeter macrocephalus*) puede bucear a profundidades mayores que cualquier otro mamífero. La mayor inmersión registrada fue de 2000 m en 1991, el protagonista fue un Cachalote macho frente a las costas dominicanas, en el Caribe. La evidencia indirecta sugiere que los Cachalotes pueden bucear hasta profundidades de 3000 m ya que se han encontrado en sus estómagos una especie de tiburones que sólo vive a esas profundidades. El récord de la inmersión más larga también lo posee un Cachalote, unos biólogos en 1983 oyeron en el Caribe sudoccidental cinco cachalotes emitiendo sonidos durante una inmersión que duró 2 horas y 18 minutos. Aunque la media es de 50 a 90 minutos sumergidos. Sin embargo durante todo ese tiempo no cesan de emitir sonidos. Algunos estudios indican que dichos sonidos son vitales tanto para su vida social como para la ecolocalización que les permite desplazarse o alimentarse. Pero hasta ahora la comunidad científica desconoce la razón de la comunicación oral de los mamíferos marinos. La acústica nos proporciona una información complementaria sobre los cetáceos.

### 3.2. Mediante acústica

Dado que los cetáceos son vocalmente activos ¿Por qué no utilizar los sonidos que ellos emiten? Existen varias vías para grabar a los cetáceos. Se suelen clasificar mediante la duración de las observaciones. Nosotros nos vamos a centrar en dos tipos de observación acústica: activa o pasiva. La primera técnica consiste en utilizar un material portátil fácilmente manejable a bordo de un barco. El sistema de grabación de la señal está for-

mado por uno o varios hidrófonos, un preamplificador y un sistema de adquisición (DAT, grabador o PC). La toma de datos se lleva a cabo al desplazarse con un barco. En un momento determinado se para el motor y se introduce el hidrófono en el agua, luego este graba todo lo que ocurre en ese preciso instante. Así obtenemos una observación instantánea.

La acústica pasiva son estaciones con sistemas de grabación fijos que graban permanentemente. Actualmente, son raros los proyectos consagrados únicamente a la observación de cetáceos pues el coste es muy elevado tanto el de la instalación como el del mantenimiento. La ventaja de este método es que además de obtener grabaciones de forma continua, se mejora la calidad de esta. Los sistemas de grabación son cuidadosamente diseñados en función de las características del entorno, el relieve submarino, la profundidad, presión, salinidad... para que la señal llegue en las mejores condiciones posibles. La acústica pasiva es menos sensible a las condiciones meteorológicas, aparte de no estar limitada a las horas diurnas. Además podemos cubrir largos periodos de tiempo (habitualmente en un espacio más pequeño). También es mejor para los animales que están la mayor parte del tiempo sumergidos, que vocalizan en altas o en bajas frecuencias. Es más fácil la recogida de datos pero su tratamiento es muy exigente. En conclusión diremos que la acústica pasiva es potencialmente más rentable a largo plazo.

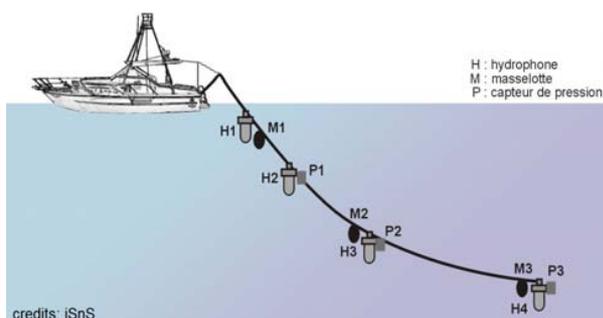


Figura 3.2.1: Observación acústica instantánea

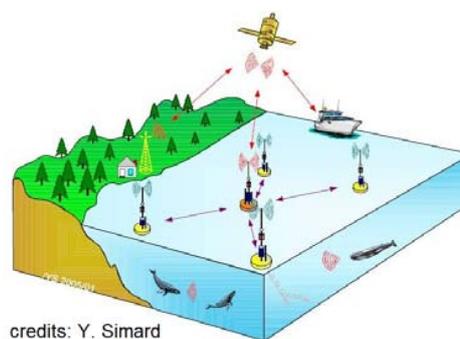


Figura 3.2.2: Observación acústica permanente

Las ventajas de utilizar la acústica son varias:

- Ganamos información sobre el sonido emitido por distintas especies de cetáceos.
- No necesitamos luz así que no estamos condicionados por las horas de día.
- La toma de datos no depende de las condiciones meteorológicas.

- Favorece el estudio de especies que pasan largos periodos bajo el agua.
- Se puede caracterizar el entorno.
- Las zonas de grabación son ilimitadas, incluso las de difícil acceso.
- El coste humano es menor.

Luego a través de la acústica se obtiene una valiosa información complementaria aunque su tratamiento no sea sencillo.

### *Detección y modelización de los sonidos emitidos por cetáceos*

Aunque nuestro objetivo es estimar el número de cetáceos que hay en una zona concreta a través de los sonidos que estos emiten, en un primer momento debemos investigar la forma de obtener dichos sonidos o cantos. Se precisa una discriminación de la señal/ruido a partir de los datos. Como podemos caracterizar los sonidos que vamos a buscar en la señal original, la filtraremos en bandas componentes y la modelización a utilizar se escogerá con arreglo a las propiedades del canto a detectar (tipo de señal, impulso o armónica, corta o larga). Para la modelización de los sonidos se pueden considerar: aproximaciones estadísticas (análisis factorial, análisis discriminante, momentos de orden superior), filtros paramétricos (modelos ARMA, NLARMA), estimación de parámetros a partir de la descomposición de espectrogramas por transformada de Fourier y transformadas en Onditas, así como métodos geométricos de reconocimiento de formas.

Toda esta cantidad de métodos propuestos se debe a que el sonido emitido por los cetáceos es muy variable. Entre distintas especies e incluso entre individuos de una misma especie, lo que hace que dependiendo del tipo de señal con el que vayamos a tratar empleemos un método u otro. Esto es un gran inconveniente ya que, al menos en la detección de los sonidos emitidos por cetáceos, no podemos generalizar ningún modelo sino que debemos analizar las técnicas que mejor se ajustan a la especie estudiada y así modelizar sus cantos.

A continuación veremos un ejemplo de la particularidad de los cantos producidos según la especie. En dichas gráficas se distinguen dos representaciones del sonido, el oscilograma (tiempo, amplitud) y el espectrograma (tiempo, frecuencia).

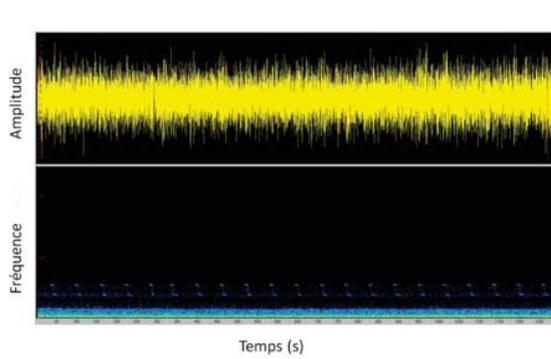


Figura 3.2.3: Canto de ballena Azul Antártica (Balaenoptera musculus - BMi)

En el espectrograma de la figura 3.2.3, cabe destacar que la franja inferior azul representa el ruido existente en la señal.

El canto de la ballena Azul Antártica está formado por una sucesión de sonidos repetitivos que se llaman clics. Como observamos en el espectrograma cada uno de esos sonidos se puede descomponer en tres partes. Caracterizando la frecuencia a la que se emite y su duración podemos modelizar un canto.

Este tipo de sonidos repetitivos son más fáciles de detectar ya que sólo necesitamos encontrar un modelo de canto y buscarlo a través de la señal mediante un filtro de auto correlación.

Este tipo de sonidos repetitivos son más fáciles de detectar ya que sólo necesitamos encontrar un modelo de canto y buscarlo a través de la señal mediante un filtro de auto correlación.

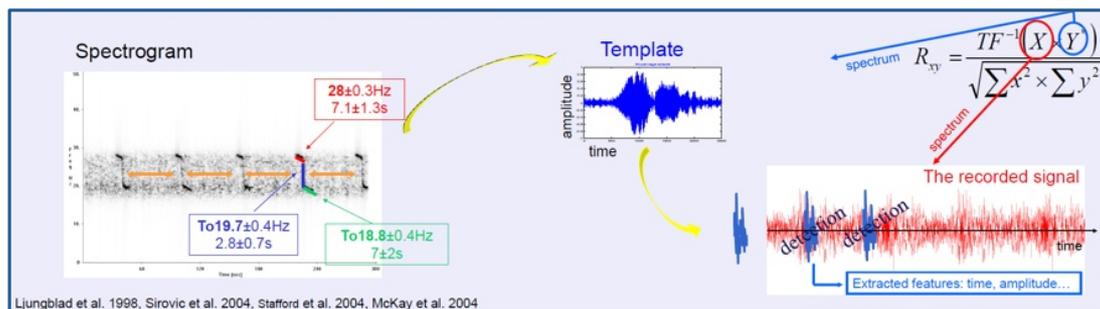


Figura 3.2.4: Representación del sistema de detección de los sonidos de la ballena Azul Antártica

Otros cantos con parecidas características son los producidos por el Cachalote o las otras 3 subespecies de ballena Azul, Pigmea de Madagascar, Pigmea de Australia y ballena Azul Índica.



Figura 3.2.5: Cachalote (*Physeter macrocephalus*)

En cambio la gran mayoría de ballenas, delfines y marsopas, incluso individuos de una misma especie, emiten sonidos muy distintos los unos a los otros. Un ejemplo de su variabilidad son los cantos de la ballena Jorobada. En la figura 3.2.6 tenemos un fragmento de un canto.

Los machos de los Jibartes realizan los cantos más largos y complejos del reino animal. Cada canto puede durar media hora o más y consiste en varios componentes principales. En la imagen podemos ver una muestra de la gran variedad de sonidos que las ballenas jorobadas emiten en una amplia gama de frecuencias. Es por ello que el método empleado para la detección de cantos repetitivos en este caso no sirve, haciendo necesario el uso de grandes bibliotecas para poder sacar conclusiones fiables.

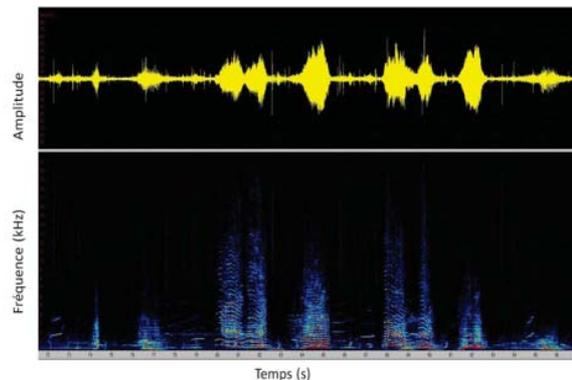


Figura 3.2.6: Canto de Ballena Jorobada (Mn)

Particularmente en el canto de la ballena Jorobada lo más sencillo es hacer una detección del momento en el que se produce el canto en contraposición a la ausencia de este.



Figura 3.2.7: Un grupo de machos se exhiben para conquistar a una hembra. Aleta dorsal y salto.



Figura 3.2.8: Golpeo de la aleta pectoral contra la superficie del agua. Técnicas de aprendizaje.



Figura 3.2.9: Ballena Jorobada junto a su ballenato descansando en el fondo del mar.



Figura 3.2.10: Salto de ballena Jorobada

El estudio de las vocalizaciones de los cetáceos se basa usualmente en el análisis de espectrogramas. Se presentan dificultades especiales cuando las diferencias entre señal y ruido son pequeñas o cuando las señales son emitidas por más de un individuo, esto sucede habitualmente en las observaciones en el medio natural especialmente por el carácter gregario de algunos tipos de cetáceos. Los inconvenientes que ofrece la acústica vienen en relación con que ésta sea submarina. Para empezar la variedad del sonido emitido por los cetáceos, presentada anteriormente, es muy grande. Esto dificulta los métodos para modelizar ya que debemos particularizar cada caso sin poder utilizar modelos generales. Otras características como la presión acústica (20-220 dB re1uPa at 1m) o la amplitud de las bandas frecuenciales (20Hz - 200kHz) hacen difícil el análisis del sonido. Además el ruido ambiente es muy variable en el tiempo y la propagación de las ondas sonoras depende de factores como la profundidad del medio, el relieve submarino y su densidad, la salinidad o la temperatura.

#### *Estimación de densidad de poblaciones utilizando acústica pasiva. Antecedentes*

La mayor dificultad para estimar la densidad de población en cetáceos es encontrar una relación entre:

1. Número de sonidos detectados / Número de sonidos producidos
2. Número de sonidos producidos / Número medio de individuos presentes

El problema podría resolverse con una firma acústica individual, es decir, si fuésemos capaces de asociar a cada individuo con el sonido que este emite. Así podríamos contar el número de cetáceos existentes y resolveríamos el problema. Hasta el momento la identificación de un individuo a través de su voz en el medio acuático es un problema que no se ha conseguido resolver. Las personas podemos ser caracterizadas por nuestra voz pero a día de hoy, esto no se sabe hacer bajo el agua, debido a que en cuanto modificamos la distancia a la que el sonido es emitido la onda sonora llega completamente deformada y no es posible identificarla. Este problema excluye los métodos acústicos de Captura-Marcaje-Recaptura al no ser capaces de diferenciar acústicamente a un individuo de otro para marcarlos. Estudios anteriores (Samaran et al. 2008), analizando la señales hidroacústicas han podido diferenciar cuatro subespecies de Ballena Azul en el Océano Antártico y el Océano Indico pero no individuos.

El único método de las técnicas visuales presentadas que ha sido adaptado a la acústica es el de *Distance Sampling* (DS) (Thomas et al. 2002). Este método propone una estimación puntual de la densidad de población basada en el conteo de señales (*cue counting*). Como hemos visto DS añade una probabilidad de detección utilizando la distribución de las distancias observadas como índice de detectabilidad. Además requiere información adicional como la probabilidad de detectar los sonidos emitidos por las ballenas y la proporción o probabilidad de producción sonora de estas. Para obtener la estimación de estos parámetros, (Marques et al. 2009) proponen el uso específicos de tag's, sensores que se colocan en la ballena. Sin embargo, no es posible generalizar este enfoque, especialmente cuando los individuos no son accesibles y calcular el valor de esos parámetros se hace imposible.

Luego los resultados no son satisfactorios, en primer lugar porque no se sabe asignar a día de hoy una firma acústica individual en el caso de las ballenas y en segundo lugar porque las observaciones acústicas son más complicadas de contar que las observaciones visuales y se necesitan sofisticados aparatos electrónicos.

#### *Método alternativo*

Es por ello que presentamos un nuevo método alternativo. Vamos a desarrollar un modelo para estimar la densidad de población en cetáceos utilizando datos a partir de un sensor fijo de acústica pasiva. Se debe de unir el número de sonidos detectados con el número de individuos del grupo emisor. Hasta ahora la investigación ha ido en dos vías, la de estimar la densidad de población en una determinada superficie, y la de estimar la frecuencia con la que emiten los cantos, lo que se llama en DS: tasa de producción sonora. En este trabajo unificamos ambas. Se define un proceso de Poisson con dos parámetros, uno espacial que determina la densidad de ballenas en un área y otro temporal que evalúa la intensidad de los sonidos emitidos por un único individuo en un intervalo de tiempo. Se supone que todas las ballenas actúan independientemente unas de otras. Con estas hipótesis, desarrollamos el modelo del número de sonidos detectados en el área en un intervalo de tiempo, dos distribuciones temporales asociadas al proceso y se calculan las funciones de verosimilitud, con el fin de calcular el estimador máximo verosímil, el punto donde se maximiza la función. De esta forma obtenemos una estimación de los parámetros espacial y temporal.

De las dos distribuciones desarrolladas, la primera es una función de probabilidad relativa al número total de cantos detectados (variable aleatoria discreta) y la segunda es una función de densidad, relativa al tiempo transcurrido entre dos cantos consecutivos (variable aleatoria continua). Para ello suponemos que el número de ballenas presentes y el número de sonidos detectados por individuo en un intervalo de tiempo siguen una distribución de Poisson de parámetros  $\lambda$  y  $\mu$  respectivamente.

Calculamos primero la distribución del número de cantos detectados en un intervalo de tiempo condicionada por el número de ballenas presentes en la zona, suponiendo que estas se comportan independientemente unas de otras, respecto al número de cantos emitidos por unidad de tiempo. Luego su distribución viene dada por la suma de los cantos producidos del número de ballenas existentes. Se calcula por métodos convencionales la media y la varianza del proceso. Utilizando el método de los momentos igualamos los momentos teóricos a los empíricos y obtenemos un estimador inicial que será utilizado como puntos iniciales para maximizar la función de log-verosimilitud en ambos casos.

Para calcular la función de distribución del tiempo observado entre dos cantos consecutivos trabajamos con el complementario. Que el tiempo entre dos cantos detectados sea mayor que un cierto tiempo fijo, quiere decir que en ese intervalo no se ha producido ningún canto, y la distribución de que el número de cantos sea 0 ya la sabemos calcular.

Este método es un estudio preliminar y además es aplicable potencialmente a otras especies.

#### 4. Aplicación del modelo a la ballena Azul Antártica (BMi)

Este modelo se ilustra con un caso estudio: estimar la población de ballena Azul Antártica utilizando un hidrófono localizado en el Archipiélago de Crozet.

Es un área donde muy pocas ballenas Azules han sido vistas y su densidad de población no ha sido previamente estimada.

Esta información es vital desde el punto de vista de la biología y de la ecología ya que la ballena Azul es una especie que se encuentra en peligro

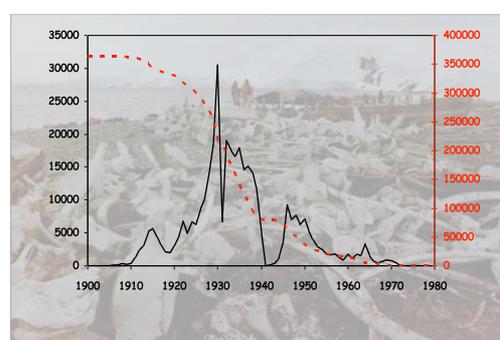


Figura 4.1: Gráfica de la evolución de BMI

de extinción desde 1967. Se estima que su población ha sido reducida al 0.15% de su población inicial y que hoy en día hay unos 3000 individuos en todos los océanos.

#### 4.1. Materiales y métodos

Los datos acústicos utilizados fueron grabados de mayo 2003 a abril 2004 en una estación del Sistema Internacional de Vigilancia (IMS) localizada en el suroeste del Océano Índico, islas Crozet (46°51'S-51°53'E). Su objetivo es controlar los ensayos nucleares que se producen en el océano (Comprehensive Nuclear Test-Ban Treaty, CTBT). Pero también graban continuamente otros sonidos naturales que se producen como el canto de las ballenas. Son de particular interés los sonidos producidos por las ballenas grandes ya que estos animales pasan la mayor parte de sus vidas en ambientes pelágicos, lo que hace difícil su evaluación por medios tradicionales. Así que, aunque el objetivo principal no era el de grabar sonidos de ballenas, como se utiliza un filtro de baja frecuencia, los cantos de las ballenas azules fueron detectadas como un producto secundario. Cuando fue descubierto se pusieron en contacto con científicos franceses para ver si los datos podían ser explotados y así surgió una colaboración entre el CEBC-CNRS, la CEA (Bruyères-le-Châtel) y el NAMC.

Los datos fueron tratados y utilizados en la tesis de Flore Samaran.

La estación está compuesta por dos unidades situadas al norte y sur de la costa de la isla Possession. Hay unos 60 km de distancia entre ambas unidades.

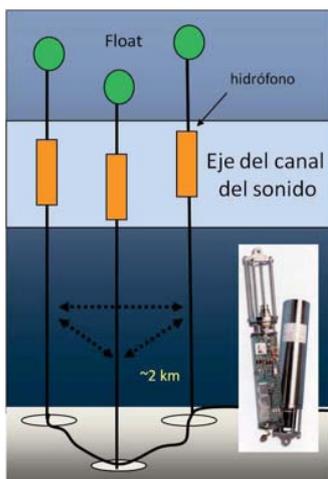


Figura 4.1.1: Unidad de grabación

Dentro de cada estación hay tres hidrófonos organizados de forma triangular separados por una longitud de 2 km. Estos están sujetos al fondo marino que tiene una profundidad de entre 1100 y 1500 metros. Suspendidos a 300 metros de la superficie, cerca de donde se encuentra el eje del canal del sonido, un área del océano donde la velocidad de propagación de las ondas sonora es mínima (canal SOFAR), lo que hace que el océano se comporte a esas profundidades como una guía de ondas. Los hidrófonos graban continuamente, 24 horas al día los 7 días de la semana. Los datos se codifican en 24 bits a una fre-

cuencia de muestreo de 250 Hz.

El sonido obtenido fue analizado para detectar la presencia de cantos típicamente asociados con la ballena Azul Pigmea (BMb) y Antártica (BMi). Se emplearon métodos de detección automática para ambos tipos de cantos. Primero se filtró la señal para quitar el ruido, se modelizó un sonido tipo de cada subespecie y se utilizó un filtro de auto correlación para detectarlas, con una relación señal/ruido de hasta -15 dB en el ancho de banda de 17-30 Hz para BMi.

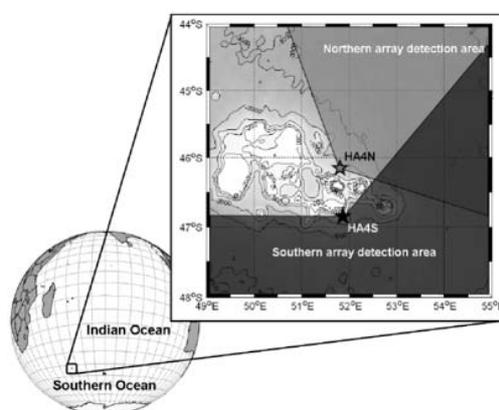


Figura 4.1.2: Localización de los hidrófonos del IMS en el Archipiélago de Crozet

En este estudio se van a tratar los datos de los sonidos de BMi registrados por sólo un hidrófono situado en el norte, que cubre una superficie de 47123 m<sup>2</sup>. Aunque el hidrófono graba continuamente, no disponemos de todos los datos debido a incidentes técnicos. Se han modificado los datos para obtener el número de sonidos producidos cada hora y el tiempo entre dos cantos consecutivos. Se ha utilizado el lenguaje de programación R para modificar los datos y poder aplicar el modelo de Poisson que permite estimar la densidad de BMi en dicho área.

## 4.2. Resultados

A través del modelo creado se obtuvo el estimador máximo verosímil de  $\lambda$  y  $\mu$ , como los valores que maximizan la función de log-verosimilitud.

Nuestro objetivo es estimar la densidad de población de ballena Azul Antártica en los alrededores de la isla de Crozet, es decir, el número de ballenas existentes en el área de grabación del hidrófono. Se fijó el intervalo de tiempo para contar el número de cantos producidos en una hora. Los resultados obtenidos se pueden ver en las tablas 4.2.1. y 4.2.2.

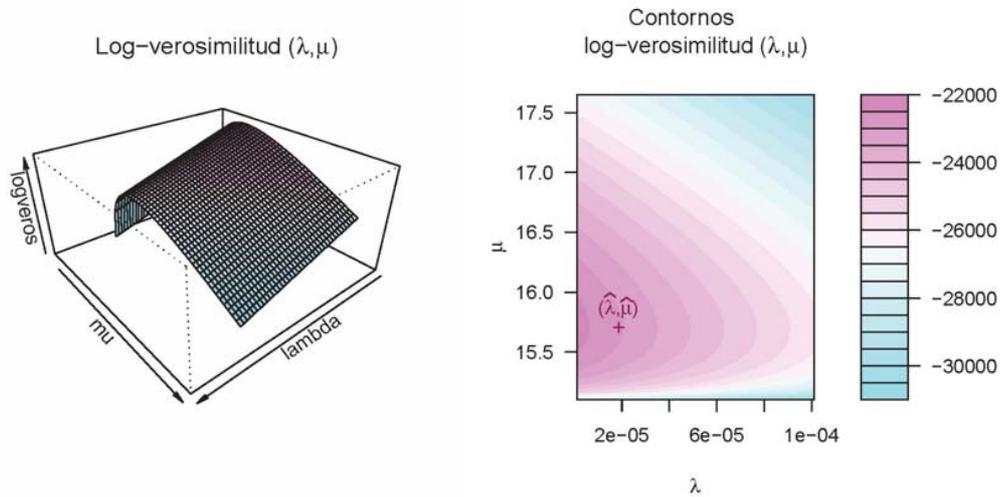


Figura 4.2.1: Función de log-verosimilitud del número de cantos y sus contornos

	$\lambda_{ini}$	$\mu_{ini}$	$\lambda_N$	$\mu_N$	$\lambda_T$	$\mu_T$
Mayo	$4.4 \cdot 10^{-5}$	14.05	$8.7 \cdot 10^{-5}$	7.05	$1.5 \cdot 10^{-4}$	5.67
Junio	$4.9 \cdot 10^{-5}$	11.67	$9.3 \cdot 10^{-5}$	6.22	$1.5 \cdot 10^{-4}$	5.36
Julio	$2.0 \cdot 10^{-5}$	13.02	$7.1 \cdot 10^{-5}$	3.73	$1.3 \cdot 10^{-4}$	3.69
Agosto	$1.8 \cdot 10^{-5}$	14.05	$7.0 \cdot 10^{-5}$	3.53	$1.4 \cdot 10^{-4}$	3.42
Septiembre	$8.8 \cdot 10^{-5}$	18.23	$5.9 \cdot 10^{-5}$	2.69	$1.3 \cdot 10^{-4}$	2.86
Octubre	$1.6 \cdot 10^{-5}$	11.69	$6.4 \cdot 10^{-5}$	2.81	$1.2 \cdot 10^{-4}$	2.84
Noviembre	$2.1 \cdot 10^{-5}$	14.56	$7.6 \cdot 10^{-5}$	4.08	$1.5 \cdot 10^{-4}$	3.70
Diciembre	$9.7 \cdot 10^{-6}$	16.61	$6.1 \cdot 10^{-5}$	2.65	$1.4 \cdot 10^{-4}$	2.81
Enero	$6.1 \cdot 10^{-6}$	13.92	$5.5 \cdot 10^{-5}$	1.55	$1.4 \cdot 10^{-4}$	1.75
Febrero	$2.9 \cdot 10^{-5}$	11.74	$7.9 \cdot 10^{-5}$	4.27	$1.2 \cdot 10^{-4}$	4.52
Marzo	$1.2 \cdot 10^{-5}$	14.56	$2.3 \cdot 10^{-5}$	14.56	$1.2 \cdot 10^{-4}$	3.08
Abril	$1.5 \cdot 10^{-5}$	11.04	$6.2 \cdot 10^{-5}$	2.57	$1.1 \cdot 10^{-4}$	2.70
Anual	$2.5 \cdot 10^{-5}$	15.71	$2.7 \cdot 10^{-5}$	17.20	$1.4 \cdot 10^{-4}$	3.69

Tabla 4.2.1. EMV de lambda y mu

La estimación de la intensidad del número medio tanto de ballenas presentes como de cantos producidos en la zona es bastante mayor por el método del tiempo entre cantos. Los estimadores obtenidos por ambos métodos en el mes de marzo, mayo, junio y en el conjunto total de datos son significativamente diferentes, lo que nos induce a pensar en modificar el modelo inicial e investigar otros modelos diferentes, bien introduciendo componentes estacionales, o cambiando la distribución del número de ballenas o de la frecuencia entre cantos.

Como el número de ballenas sigue una distribución de Poisson de parámetro lambda vamos a calcular los intervalos de confianza al 90% y 95% del número medio de ballena Azul Antártica, calculados según el lambda estimado, es decir, el número de individuos mínimo y máximo dado por las dos distribuciones.

	90%	95%	90%	95%
Mayo	[1, 8]	[1, 8]	[3, 12]	[2, 13]
Junio	[1, 8]	[1, 9]	[3, 12]	[2, 13]
Julio	[1, 7]	[0, 7]	[2, 10]	[2, 11]
Agosto	[1, 7]	[0, 7]	[3, 11]	[2, 12]
Septiembre	[0, 6]	[0, 6]	[3, 11]	[2, 12]
Octubre	[1, 6]	[0, 7]	[2, 10]	[2, 11]
Noviembre	[1, 7]	[0, 8]	[3, 11]	[2, 12]
Diciembre	[0, 6]	[0, 7]	[3, 11]	[2, 12]
Enero	[0, 5]	[0, 6]	[3, 11]	[2, 12]
Febrero	[1, 7]	[1, 8]	[2, 10]	[2, 11]
Marzo	[0, 3]	[0, 3]	[2, 10]	[2, 11]
Abril	[0, 6]	[0, 7]	[2, 10]	[1, 11]
Anual	[0, 3]	[0, 4]	[3, 11]	[2, 12]

Tabla 4.2.2. IC del 90 y 95% de confianza sobre el número de ballenas

Para ver cómo se ajusta la distribución teórica estimada a nuestros datos la hemos representado junto al diagrama de barras del número de cantos producidos en una hora. Del mismo modo pintamos en la misma gráfica el histograma de los tiempos observados entre cantos consecutivos y su densidad teórica estimada.



Figura 4.2.2: Representación de las distribuciones teóricas estimadas junto con las empíricas

### 4.3. Conclusiones

Aunque se observa una presencia de forma anual de esta subespecie de ballena Azul del Océano Antártico, podemos destacar que en los meses de invierno (mayo, junio y julio) hay un incremento en los sonidos detectados, por lo que creemos que hay una mayor presencia de individuos. Esto tiene una explicación ya que es el periodo en el que las

ballenas emigran hacia aguas menos frías. Y nos lleva a pensar en componentes estacionales.

La estimación a la que llegamos es cercana a los 5 individuos, lo que corresponde a las expectativas de los biólogos. Es difícil verificar las hipótesis, en particular la independencia del número de cantos producidos por una ballena es prácticamente imposible. No vamos a encontrar ninguna publicación que asegure dicha independencia, pero tampoco ninguna que la desmienta. Podemos asumir que las hipótesis del modelo son respetadas aun cuando se desconocen los motivos que las llevan a emitir sonidos.

En los IC observamos que tanto en el método del número de cantos producidos en un intervalo de tiempo fijo, como en el tiempo entre los cantos parece no existir componentes estacionales, aunque no se puede afirmar nada debido al reducido número de ballenas. Por otro lado, los datos reflejan que sí que existe cierta estacionalidad, (hipótesis apoyada por estudios llevados a cabo anteriormente) pero la falta de horas de grabación en algunos meses hace que no sea suficientemente visible en nuestros datos.

Como podemos ver en la figura 4.2.2 el ajuste de la distribución teórica a la empírica no es muy bueno, mejorando en el segundo método, basado en el tiempo entre los cantos detectados. Esto podría ser debido a que en él se está utilizando toda la información disponible mientras que cuando estimamos teniendo en cuenta el número de sonidos detectados en una hora, estamos perdiendo información. Contamos el número de cantos pero no cuándo estos se han producido. También el segundo ajuste parece funcionar mejor en los intervalos de confianza. Podemos observar, en efecto, que con el primer método algunos intervalos de predicción comienzan en 0. Esto es una contradicción con el hecho de que cada mes se ha detectado al menos un canto, luego al menos debería de estar presente una ballena. En resumen, el segundo modelo ofrece un mejor ajuste a nuestros datos, proporcionando estimadores más fiables.

Este nuevo método para estimar densidades de cetáceos, utilizando los datos provenientes de la acústica pasiva, tiene como ventaja que no necesita la estimación mediante sensores de una tasa de producción sonora como los otros métodos alternativos proponen. Sino que unifica ambas: la estimación de la densidad de población en una determinada superficie y la frecuencia con la que se emiten los cantos.

Lo aquí expuesto es sólo una pequeña parte de lo que se puede desarrollar y mejorar el modelo. Un ejemplo de ello es nuestro siguiente objetivo que consiste en ir quitando

las hipótesis impuestas (el número de ballenas y el número de sonidos detectados por individuo en un intervalo de tiempo siguen una distribución de Poisson) para que el modelo se ajuste mejor a nuestros datos. Todavía hay un largo camino por recorrer.



Figura 4.3.1: Ballena Azul (*Balaenoptera musculus*)

La mayor ventaja del modelo introducido es que puede ser modificado para que los datos se ajusten bien. Es lo suficientemente general que puede ser usado para estimar poblaciones en otras especies y escenarios con sus apropiadas modificaciones. Podemos jugar con la distribución del número de ballenas, la distribución del número de cantos y la hipótesis de independencia entre las ballenas. Luego dependiendo del estudio, se irá añadiendo información al modelo.

### Agradecimientos

Rocío Prieto González agradece a la Fundación “La Caixa” y al Gobierno francés la concesión de la beca que ha permitido llevar a cabo tan apasionante proyecto.

También agradecer a Laurent Bouveret presidente de la asociación L’OMMAG de Guadeloupe, Francia, por compartir con nosotros sus maravillosas fotos. Muchas gracias.

### Referencias

- 1 BUCKLAND, S., ANDERSON, D., BURNHAM, K., LAAKE, J., BORCHERS, D., THOMAS, L. (2001) “Introduction to Distance Sampling”, *Oxford University Press*.

- 2 CARWARDINE, M., HOYT, E., FORDYCE, R. E., GRILL, P. (1999) "Ballenas, delfines y marsopas". Ediciones Omega, s.a. (ISBN 84-282-1163-9).
- 3 H. M. TAYLOR, S.K. (1998) "An introduction to stochastics modeling". *Academic Press*, third ediction 32, 146–154.
- 4 MARQUES, T., THOMAS, L., WARD, N., DIMARZIO, N., TYACK, P. (2009) "Estimating cetacean population density using fixed passive acoustic sensors: An example with blainville s beaked whales". *J. Acoust. Soc. Am.* 125, 1982–1994.
- 5 MCDONALD, M., FOX, C. (1999) "Passive acoustic methods applied to fin whale population density estimation". *J. Acoust. Soc. Am.* 105, 2643–2651.
- 6 MCDONALD, M., MESNICK, S., HILDEBRAND, J. (2006) "Biogeographic characterization of blue whale song worldwide: using song to identify populations". *Press, Oxford.* JCRM 8, 55–65.
- 7 PRIETO GONZÁLEZ, R., VALSERO BLANCO, M.C., SAMARAN, F. Y ADAM, O. (2010). "Comparación de métodos de estimación de población de Ballena Azul del océano Antártico mediante un modelo espacio-temporal de Poisson". *Revista del XXXII Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa*, SEIO 2010. Orbigraf, s.l. ISBN: 978-84-693-6152-8 (11 pag).
- 8 SAMARAN, F., ADAM, O., MOTSCH, J., GUINET, C. (2008) "Definition of the antarctic and pygmy blue whale call templates. Application to fast automatic detection". *Canadian Acoustic* 36, 93–102.
- 9 SAMARAN, F., PRIETO GONZÁLEZ, R., GANDILHON, N., VALSERO BLANCO, M.C., GUINET, C., LOUIS, M. Y ADAM, O. (2010). "L´acoustique passive pourrait-elle être une alternative aux observations visuelles pour l´estimation des densités de populations? Principes et limites sur une espèce de mysticètes: la baleine bleue antarctique." *Revue Acoustique et Techniques*, 61, p. 30-34.
- 10 THOMAS, L., BUCKLAND, S., BURNHAM, K., ANDERSON, D., LAAKE, J., BORCHERS, D., STRINDBERG, S. (2002) "Distance sampling. Encyclopedia of Environmetrics" (ISBN 0471 899976) pp. 544–552.
- 11 WIGGINS, S., MCDONALD, M., MUNGER, L., HILDEBRAND, J., MOORE, S. (2004) "Waveguide propagation allows range estimates for north pacific right whales in the bering sea". *Canadian Acoustics* 32, 146–154.