

TESIS DOCTORAL

2012

Técnicas acústicas y software libre: Aplicaciones en la gestión costera

Noela Sánchez Carnero



Universidade da Coruña
Departamento de Biología Animal,
Biología Vegetal y Ecología

Técnicas acústicas y software libre: aplicaciones en la gestión costera

Noela Sánchez Carnero

2012

Directores:

Juan Freire Botana
Daniel Rodríguez Pérez

Departamento de Biología Animal,
Biología Vegetal y Ecología



Documento bajo licencia Creative Commons
© 2012 — Noela Sánchez Carnero
Facultad de Ciencias, Universidade da Coruña

*A todos os que son “a miña familia”
(de dúas e catro patas)*



Agradecimientos

Realizar una tesis doctoral es un proceso largo (¡muy largo! en algunos casos) por eso hay mucho tiempo para necesitar, pedir y recibir ayuda, tanto en lo académico (“científico”) como en lo personal. Los “Agradecimientos” es el cachito de la tesis en el que tenemos la oportunidad de agradecer todo esto y lo aprovecharé sin hacer un esfuerzo por ser breve.

En lo profesional, ...

En primer lugar debo y quiero agradecer a mi director Juan Freire, no por haberme ayudado mucho con la física acústica, ni por haberse sentado conmigo a resolver ecuaciones (para que vamos a mentir, deben ser de las pocas cosas que no se le dan bien), pero sí por haberme dado el soporte necesario para llevar a cabo este trabajo, que no ha sido rápido ni sencillo, por haber confiado en mí y en mi trabajo, por haberme permitido participar en proyectos dispares, diversificarme y, sobre todo, por haberme enseñado a escribir, a ser crítica,... y deshacer el mito de que un científico debe dedicarse únicamente a un tema. Espero poder seguir abordando proyectos nuevos (metiéndome en follones) contigo.

Si el sistema académico fuese justo (del mundo ya ni hablamos) las tesis podrían ser firmadas por más de un autor, y en ese caso Daniel Rodríguez (codirector de esta tesis) sería coautor con tanto derecho como yo misma. Sin caer en la falsa modestia ni en el peloteo (innecesario ya), esta tesis no habría llegado a su fin NUNCA sin su ayuda. Otra sí, seguro (de hecho alguna otra idea teníamos ya en la recámara Juan y yo), pero no ésta. Tengo que agradecerle su paciencia infinita para enseñarme física (una y otra vez), para entender la diversificación de mis “actividades científicas” y no impacientarse por el escaso tiempo dedicado a la tesis en algunas ocasiones, agradecerle todo el tiempo sentado a mi lado delante de un ordenador intentando darle forma a los ecos, a los análisis y a los textos, el olvido del significado de los fines de semana y festivos, ... y todo esto para enseñarme física, estadística, a ser sumamente crítica con los resultados obtenidos y para obligarme a aprender esa parte de “vendedor” que todo científico debe tener a la hora de mostrar sus resultados (indispensable para contrarrestar su empeño por aclarar las debilidades del trabajo). De corazón, muchas gracias.

Cuando esta tesis dió su primer giro hacia la física (y la autora tuvo su primer ataque de pánico) Victor Espinosa estuvo allí ofreciéndose como apoyo, poniendo a mi disposición todos los medios con los que contaban (él y su grupo de investigación). Debo dar las gracias (a él y a su equipo, Esther, Nuria, Miguel Rodilla) por interesarse por mi trabajo, por acogerme en numerosas

ocasiones y por su amabilidad y apoyo (importante también en los momentos duros de la tesis). Además, debo agradecer a Victor su ejemplo de honestidad (no tan habitual en el mundo académico como debería) al renunciar a la codirección de esta tesis por considerar que el tiempo invertido no lo valía (y no por eso dejar de corregir la introducción física de la misma). Muchas gracias.

Pero esta tesis ha durado mucho, y a lo largo de estos años han sido muchos los físicos acústicos que se han “apiadado” de una pobre “bióloga” en apuros y me han ofrecido su tiempo, consejos y ánimos, haciendo que el “maravilloso mundo de la acústica” fuese más acogedor. Halvor Hobak, Marek Moszynski, Helge Balk, Andrzej Orłowski,... gracias por el apoyo a mi trabajo y por enseñarme que los físicos (además de un poco *friquis*) sois gente encantadora. Jorge Martínez... no me olvido de tus “clases particulares” de física, desde que me explicaste las convoluciones... ¡no dejan de aparecer en mi vida!

Y, para terminar con los físicos (sólo en los agradecimientos), Jose Antonio Domínguez; no me has enseñado nada de física acústica, pero has sido un ejemplo de disponibilidad para la colaboración y has convertido la teledetección óptica en un campo tremendamente atractivo al que espero dedicarle mucho tiempo a partir de ahora.

En la parte más “biológica” (aunque las dos son licenciadas en Ciencias del Mar), debo agradecer a Sara Aceña y a Elena Couñago su colaboración en varios de los capítulos de esta tesis. Aunque la física sea “lo que da más miedo” todo lo demás requiere también de ayuda y trabajar en equipo es siempre mucho más agradable. Me habéis ayudado en la parte más tediosa del trabajo y ha sido estupendo trabajar con vosotras.

Pero la ayuda recibida no se restringe a lo “científico”, Inma Álvarez se ha ocupado de las poco gratificantes gestiones que todo trabajo científico requiere, gracias por eso y por los paseos por el 4º piso (terapia mensual indispensable para mantener la cordura). Gracias también a Julio Parapar por ser un anfitrión tan amable (y comprensivo con la usurpación accidental de bombones). Y, en general, gracias a los miembros de mi grupo de investigación, por haber compartido este proceso de aprendizaje (a veces a golpes) conmigo.

En lo personal, ...

Durante todos los años que pasan entre que uno decide (sin saber muy bien por qué) hacer una tesis, hasta que por fin la termina, la tesis se convierte en protagonista de tu vida. Es la razón por la que se dejan de hacer cosas con los amigos (“tengo que trabajar en la tesis”) y por la que se hacen otras (plantearte

trasladar tu domicilio a la Universidad para ahorrar el tiempo del autobús, por ejemplo). En todo el tiempo que dura esto la familia y los amigos sufren los efectos colaterales de la tesis y tiene que entenderte, apoyarte, animarte y ayudarte en muchas ocasiones. Por eso, a todos, muchas gracias.

Por aguantar (y creo que creer) mi reiterada promesa “lo haré cuando termine la tesis” ... gracias a mis amigos: Marquitos, Iago, Nati, Diego (y familia), Paula, Fuli, Pauli, Miriam, Marmoto, Perito (cariñín), Martín, Jose, ...

Por acogerme y cuidarme en mis múltiples visitas a Madrid.... gracias a *mis caseros madrileños* (Nacho, Ange, Abueli, Visa, Dorka y Duda) y a al equipo de *físicos locos* de la UNED (Jesús, Oscar, Manuel, Cristina, Carlos, etc.).

Por aprovechar mis estancias en Sevilla para iniciarme en el maravilloso mundo del aceite de oliva, para enseñarme las mejores montañas de la península, para dejarme disfrutar de las naranjas de Mairena... gracias a mi equipo de geógrafos particular (Joaquín, Virginia, Pablo, Miguelito y Mónica). Y gracias a *mi comunidad* (Raquel, Dani, Hora, Marinita, Silvio y su *alma mater* Mónica) por acogerme de tal forma que me da tanta pena cada vez que me vuelvo.

Por haber sido y estado, ni más ni menos.... gracias a mi familia (Padre, Madre, Iria, Marta, Dani, Xiana). Y especialmente a mi padre, Javier Sánchez ¿quien le habría dicho a él que iba a tener que aprender acústica a estas alturas?

Y, por haber sido mi singular “*dream team*” en los últimos años y, especialmente, en la recta final de este proyecto personal... Elena, Pablo y Mouro, gracias por todo. Por la ayuda con el trabajo (no creo que nadie conozca tanto la bibliografía de este trabajo como Elena, ni vaya a leer tantas veces la tesis como Pablo, obviando a Dani, claro), por el avituallamiento en los meses de encierro (basado principalmente en grelos), por los paseos con Mouro que me obligaban a salir de casa y, sobre todo, por la adecuada gestión de “mi estrés” (que se dice pronto, pero no es fácil). De no haber estado conmigo, estos meses habría perdido la cordura (alguna me temo que se fue). Dani, a través del teléfono, has sido también miembro de honor de este equipo (he consultado la lista de “Deberes de un director” y te has sobrepasado).

Y en un grupo de varios: gracias a los repartidores de pizzas que nos han alimentado en las largas noches de trabajo, gracias a Lorcho por hacer de despertador a su “singular” manera, gracias a Enlared y María José por dejarme “gorronear” sus equipos, etc.

Por último, este proyecto puede alardear de contar con colaboraciones especiales: Horacio Hermoso, gracias por plasmar en una lámina tu particular ima-

gen de una onda en el mar para dar color a este trabajo; Angélica Soleiman, gracias por la maravillosa foto que es portada; Elena y Mouro, gracias por hacer de modelos *amateur* para las representaciones físicas.

A todos, de verdad, ¡muchas gracias!



Resumen / Resumo / Summary

Resumen

Las técnicas acústicas son la herramienta adecuada para el estudio de los fondos marinos en la zona costera sumergida, debido a su capacidad de penetración en la columna de agua, mucho mayor que la de la luz. Sin embargo todavía cuentan con inconvenientes importantes para su uso generalizado: i) elevado coste, ii) falta de metodologías abiertas y iii) formación específica necesaria.

Acercar las técnicas acústicas a los usuarios requiere: utilizar equipos económicos, definir metodologías abiertas que no dependan de software comercial y hacer un esfuerzo por desmitificar estas técnicas, haciendo los conocimientos físicos más asequibles.

Siguiendo esta motivación, se presentan cuatro aplicaciones al estudio de los hábitats bentónicos de la zona costera: cálculo de batimetrías utilizando sondas monohaz e información cartográfica digital, clasificación de hábitats bentónicos que aprovecha los beneficios de una corrección física de los datos, estimación de las estructuras vegetales situadas sobre el fondo usando un sónar de barrido lateral orientado verticalmente, y cartografiado de bancos de bivalvos endobentónicos utilizando una sonda de haz partido.

Todas estas aplicaciones utilizan equipos de bajo coste (o con bajos costes previsibles en un futuro cercano) y software libre desarrollado para analizar los datos acústicos, lo que aporta versatilidad y transparencia a las metodologías, facilitando el acceso de todos los usuarios a estas herramientas.

Resumo

As técnicas acústicas son as ferramentas adoitadas para o estudio dos fondos mariños na zona costeira somerxida, debido á súa capacidade de penetración na columna de auga, moito maior que a da luz. Sen embargo, inda contan con inconvenientes importantes para o seu uso xeneralizado: i) custe elevado, ii) falta de metodoloxías abertas e iii) formación específica necesaria.

Achegar as técnicas acústicas ós usuarios require: empregar equipos económicos, definir metodoloxías abertas que non dependan do software comercial e facer un esforzo por desmitificar estas técnicas, facendo os coñecementos físicos alcanzables.

Seguindo esta motivación, preséntanse catro aplicacións ó estudio dos hábitats bentónicos da zona costeira: cálculo de batimetrías empregando sondas monohaz e información cartográfica dixital, clasificación de hábitats bentónicos que aproveita os beneficios dunha corrección física dos datos, estimación das estruturas vexetais situadas sobre o fondo empregando un sónar de barrido lateral orientado verticalmente, e cartografado de bancos de bivalvos endobentónicos empregando unha sonda de haz partido.

Todas estas aplicacións empregan equipos de baixo custe (ou con baixos custes previsibles nun futuro próximo) e software libre desenvolvido para analizar os datos acústicos, o que aporta versatilidade e transparencia ás metodoloxías, facilitando o acceso de tódolos usuarios a estas ferramentas.

Summary

Hydroacoustic techniques are suitable tools for seabed study in the submerged coastal area, because of their ability to penetrate into the water column, much greater than light's. Nevertheless, significant disadvantages for their general use still exist: i) high costs, ii) lack of open methodologies and iii) need for specific training and knowledge.

Bringing acoustics techniques to the users requires the use of affordable equipment, the definition of open methodologies (not dependent on commercial software) and an effort to demystify these techniques, approaching the physical knowledge to the user.

Following this motivation, four applications are presented for the study of the seabed in the coastal area: bathymetry computation using singlebeam echosounder and digital geographic data, benthic habitat classification exploiting the benefits of the physical correction of the data, estimation of the bottom seagrass structures using vertically oriented sidescan sonar, and mapping of bivalve beds using a split beam.

All these applications use low-cost equipment (or with low foreseeable costs in the near future) and free software developed to analyze the acoustic data, which provides versatility and transparency to the methodologies, facilitating access to these tools to all users.



Índice general

Agradecimientos	v
Resumen / Resumen / Summary	xI
Índice general	xv
Estructura de la tesis doctoral	xix
1 Introducción	1
1.1. Importancia de la zona costera	1
Rías gallegas y costa mediterránea andaluza	3
1.2. Métodos de estudio de la zona costera	5
1.3. Las herramientas acústicas	15
Bases físicas	15
Equipo acústico	34
1.4. Software y métodos de análisis	38

Objetivos	47
Aplicaciones acústicas	50
2 Método rápido y de bajo coste para batimetría con sonda monohaz	51
2.1. Introducción	52
2.2. Metodología	57
2.3. Valoración de la metodología	64
Caso de estudio: la Ría de Cedeira	64
Campaña acústica	66
Batimetría resultante	67
Interpretación geomorfológica de la batimetría	70
Valoración del coste de la metodología (trabajo y tiempo)	71
2.4. Discusión	72
2.5. Conclusiones	74
3 Corrección mejorada de la longitud de pulso para clasificación acústica de fondos	77
3.1. Introducción	78
3.2. Área de estudio y toma de datos	83
3.3. Métodos	85
Detección del fondo	85
Correcciones de profundidad	86
Cálculo de variables	88
Tratamiento de las variables	90
Clasificación	91
Validación	91
3.4. Resultados	92
3.5. Discusión	96
3.6. Conclusión	100
4 Sonar de barrido dirigido verticalmente para cartografía de fanerógamas marinas	103
4.1. Introducción	104
4.2. Material y métodos	107
Área de estudio	107
Funcionamiento del Sidescan Sonar	108

Trabajo de campo	110
Análisis de los datos	112
4.3. Resultados y Discusión	118
4.4. Conclusiones	125
5 Sonda de haz partido para estimar la densidad de bivalvos infaunales	129
5.1. Introducción	130
5.2. Material y métodos	132
Área de estudio	132
Estaciones de muestreo	132
Campaña acústica	134
Análisis de datos	137
5.3. Resultados	140
5.4. Discusión	144
5.5. Conclusiones	147
5.6. Anexo: Variables texturales de Haralick	148
Discusión	152
Conclusiones	163
Bibliografía	167
Bibliografía	167
Apéndices	199
Tabla de símbolos	199
Implementación en Octave de los métodos introducidos en la tesis	203
Índice alfabético	231



Estructura de la tesis doctoral

Esta tesis constituye un compendio de artículos científicos publicados, o en proceso de publicación, independientes entre sí (uno no es continuación del anterior) y autocontenidos. En cada uno de ellos se establece una problemática que es contextualizada, estableciéndose un objetivo, para la consecución del cual se define una metodología, y se exponen y discuten sus resultados. Además, cada uno de estos capítulos cuenta con unas conclusiones propias, extraídas del trabajo presentado él.

Este grupo de artículos constituye un bloque central, en el que cada capítulo presenta una aplicación de la tecnología hidroacústica a la gestión costera. En concreto, cada uno de ellos presenta una solución metodológica a una necesidad real, planteada por los usuarios (*stakeholders*) al grupo de trabajo en el que se integra la autora.

Este bloque viene precedido por una introducción en la que se contextualiza la problemática general donde se engloban todos los capítulos centrales. Además en este apartado se introducen todos los conceptos físicos necesarios para, sin necesidad de una formación específica en física acústica, seguir con comodidad el desarrollo de los capítulos centrales. Esta sección se ha querido escribir de una forma sencilla e intuitiva, renunciando en ocasiones a abordar los conceptos físicos en profundidad, los cuales, por otro lado, son ampliamente explicados en diferentes publicaciones especializadas.

En un tercer bloque se aborda la discusión de las aportaciones y limitaciones de los resultados presentados en los capítulos centrales dentro de la problemática global (la gestión costera). Además se proponen algunas conclusiones generales a la totalidad del trabajo presentado.

Por último, el trabajo contiene dos anexos: el primero de ellos es un resumen de los símbolos que aparecen en las ecuaciones presentes a lo largo del trabajo y sus significados, para facilitar su seguimiento. El segundo corresponde al código del software, desarrollado para cada una de las aplicaciones presentadas en los capítulos centrales, comentado para facilitar su comprensión y edición para su mejora. Este código, junto con los manuales de uso de cada una de las aplicaciones, está disponible en Internet¹.

¹<http://www.recursosmarinos.net/downloads>. Fecha de última consulta: 23 de Abril de 2012

Introducción

1.1. Importancia de la zona costera

En un planeta con más de un millón y medio de kilómetros de línea de costa (Burke *et al.*, 2001), donde el 40% de la población mundial se concentra a menos de 100 km de la misma (Martínez *et al.*, 2007), muchos de los intereses económicos y ecológicos se localizan en la **zona costera**. Sin embargo, a pesar de su importancia, no existe consenso a la hora de definir esta área. En la literatura científica los investigadores definen la zona costera como aquella en la que las características físicas, ecológicas o antropológicas/sociales objeto de su estudio mantienen sus valores constantes o dentro de un rango de oscilación determinado.

De este modo, encontramos desde definiciones generalistas: *franja de la superficie terrestre, de anchura variable, que abarca espacios emergidos y sumergidos en los que confluyen e interactúan elementos y procesos propios de la atmósfera, la litosfera y la hidrosfera* (Carter, 1989); o *área geográfica ancha en la cual factores terrestres y marinos se mezclan produciendo formas topográficas y sistemas ecológicos únicos* (Gopinath, 2010); o definiciones administrativas: *región completa desde la línea batimétrica de 200 m de profundidad, en el mar, hasta la línea topográfica de 200 m de altitud, en la tierra* (International Geosphere Biosphere Programme, dentro del programa Land Ocean Interactions in

the Coastal Zone); a definiciones más concretas que sí establecen límites precisos: para estudios con enfoque marino, *el área marina situada entre 0 y 100 m de profundidad* (Burke *et al.*, 2001), o con enfoque geomorfológico, *el espacio restringido entre la línea de bajamar y la de pleamar* (Guilcher, 1957), entre muchos otros.

Cuando se trata de un enfoque integral, de gestión, donde todos los aspectos del área de estudio son relevantes (biológico, fisiográfico, económico, etc.), se necesita una definición poco restrictiva, que se asegure de abarcar toda el área de interés. Martínez *et al.* (2007), por ejemplo, define con este fin la zona costera como ***aquellas regiones comprendidas desde el borde inferior de la plataforma continental (a unos 200 m de profundidad), incluyendo las zonas intermareales y las áreas emergidas adyacentes hasta unos 100 km de la línea de costa.***

Esta definición dibuja una zona costera de elevada importancia ecológica y socioeconómica: i) es el área donde tiene lugar la cuarta parte de la producción primaria del planeta (Cracknell, 1999), ii) es reserva de recursos minerales (Rona, 2008) iii) proporciona el 90 % de los recursos pesqueros (Cracknell, 1999), iv) tienen lugar en ella el 90 % de los procesos de mineralización sedimentaria (Cracknell, 1999), v) tiene una alta dinámica geológica (Woodroffe, 2003), vi) acoge a más del 40 % de la población humana (PNUD, 2005), entre otras muchas cosas, que la convierten en un área singular y vulnerable de gran importancia económica, ecológica y social.

Con una perspectiva humana, el área costera nos proporciona una gran parte de los servicios ecológicos que utilizamos como soporte vital. No solo nos abastece de alimento (que obtenemos a partir de la pesca y la acuicultura) y procesa gran parte de nuestros residuos; los sistemas costeros son claves en la protección contra catástrofes naturales (el papel de los manglares ante tsunamis, por ejemplo (Environmental Justice Foundation, 2005; Chang *et al.*, 2006)), o en el transporte de mercancía a través de los puertos. El uso de todos estos servicios representa una intensa presión sobre la zona costera que suele provocar efectos adversos en los ecosistemas de difícil retorno.

Debido a su importancia económica, ecológica y social, las áreas costeras han sido objeto de numerosos estudios en las últimas décadas (véanse como ejemplo las revisiones de Turner (2000); Burke *et al.* (2001); Small y Nicholls (2003); Martínez *et al.* (2007) y la extensa bibliografía en ellas citada). Muchos de estos estudios han destacado la necesidad y urgencia, para el futuro de estas áreas, de aplicar medidas de monitorización y gestión que trabajen para permitir

mantener actividades de explotación sostenibles para las comunidades costeras preservando, al mismo tiempo, los ecosistemas (Clark, 1996; Gopinath, 2010).

El presente trabajo responde a una motivación de gestión integral del área costera comprendiendo las zonas sumergida y emergida. Por eso, aunque se desarrolla casi exclusivamente en la zona sumergida, explora nuevas aplicaciones que respondan a necesidades de gestión de la zona costera integral, definida por Martínez *et al.* (2007). En este sentido a lo largo de este trabajo se adoptará para la zona costera la definición de estos autores y no otra limitada al área sumergida (como Burke *et al.*, 2001).

Rías gallegas y costa mediterránea andaluza

Para ilustrar esta importancia de la zona costera, consideremos el caso de la Comunidad Autónoma de Galicia (Fig. 1.1), área donde se enmarcan 3 de los 4 trabajos que se presentarán a continuación. Galicia es una región altamente dependiente de su zona costera. Lo intrincado de su límite tierra-mar le aporta más de 2200 km de longitud de línea de costa (Casal *et al.*, 2010) que acogen un alto número de asentamientos humanos directamente relacionados con el mar (Freire y García-Allut, 2000).

Las costas de esta región se caracterizan por la presencia de las rías. Las rías gallegas son estructuras que tienen su origen en el hundimiento de bloques a lo largo de la costa (por la presencia de fallas) y en su posterior inundación por el mar. Estas estructuras presentan normalmente forma de V, abiertas hacia el SO en la costa atlántica gallega y hacia el N en la cantábrica, lo que las convierte en zonas protegidas de gran parte del oleaje incidente.

La presencia de estas áreas protegidas, donde muchas especies encuentran las condiciones idóneas para su desarrollo, junto con los eventos de *upwelling* estacional, que provocan la llegada de aguas frías muy ricas en nutrientes (Fraga, 1981; Fiuza *et al.*, 1998), convierte a las costas gallegas en una área biológicamente muy productiva. Prueba de ello son las más de 180000 toneladas de peces y mariscos (cefalópodos, moluscos y crustáceos) que en 2011 fueron desembarcadas en Galicia, con un valor de primera venta de más de 458 millones de euros¹.

Además de su productividad, estas costas cuentan con una alta diversidad geomorfológica (Blanco Chao y Pérez Alberti, 1996) que da lugar a fondos rocosos

¹<http://www.pescagalicia.es> Fecha de última consulta: 23 de Abril de 2012

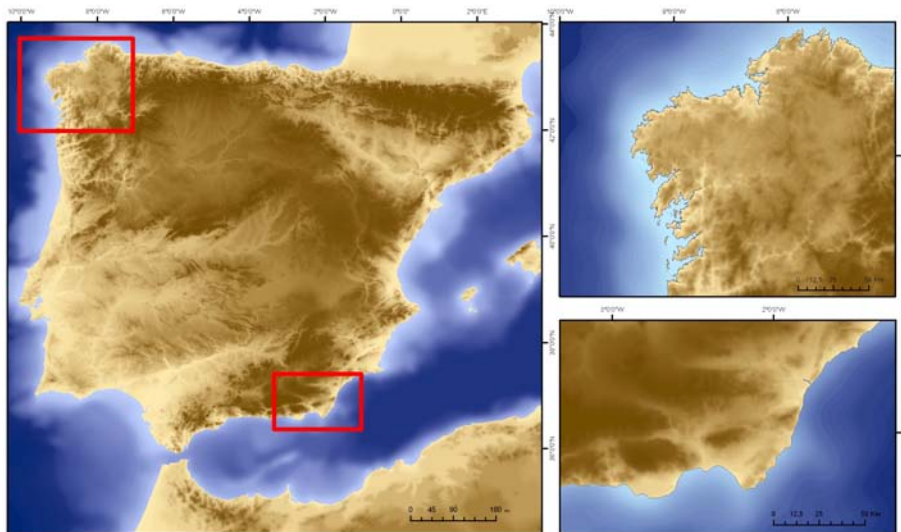


Figura 1.1: Localización de las zonas de estudio: Galicia y Cabo de Gata

y de granulometría variada (Rey Salgado, 1993) donde habitan un gran número de especies. Con el objetivo de preservar estos hábitats se han generado numerosas figuras de protección. Así, existen 29 Lugares de Importancia Comunitaria (LICs) y recientemente se han añadido dos áreas marinas protegidas de interés pesquero (RMIP Os Miñarzos y RMIP de Cedeira) y un parque nacional (Parque Nacional de las Islas Atlánticas).

En el extremo opuesto de la Península Ibérica se encuentra la costa mediterránea andaluza (Fig. 1.1). Esta costa se caracteriza por un régimen micromareal (Fraile, 2011), común a todas las costas mediterráneas, y por la práctica ausencia de una plataforma continental desarrollada, fruto de las fuertes pendientes existentes como consecuencia de la presencia de las cordilleras Béticas (Ojeda Zújar, 2003).

En sus fondos predominan los arenales (como consecuencia de la erosión de los múltiples deltas de estas costas) que cuentan en muchos casos con praderas de

fanerógamas (Templado, 1995; Moreno y Guirado, 2003), lo que les otorga una gran importancia ecológica (ver, como ejemplo, trabajos citados en Lefebvre *et al.*, 2009).

A diferencia de lo que sucede en Galicia, donde la actividad pesquera ha sido y es de gran relevancia económica y social, en los 575 km de litoral mediterráneo andaluz este sector vio reducida su producción en más de un 50 % en la década de 1960, debido a la sobrexplotación (Terán *et al.*, 1986), provocando una reconversión de la economía de estas áreas hacia sectores como el turístico (Aznar, 2003) y hacia la agricultura intensiva especializada en cultivos bajo plásticos (Aznar y Sánchez-Picón, 2010).

Su riqueza faunística y geomorfológica es responsable de la presencia del Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar, creado en 1987, siendo el parque natural de mayor superficie y relevancia ecológica de todo el Mediterráneo occidental europeo. A este parque se unen otras figuras de protección a lo largo del litoral mediterráneo andaluz: reservas y parajes naturales, monumentos naturales, LICs, etc.

1.2. Métodos de estudio de la zona costera

Para una gestión eficaz y eficiente de la zona costera es imprescindible contar con información biológica, ecológica, física y social, que sea de calidad (Clark, 1994; Turner, 2000; Rodríguez *et al.*, 2009). Pero, dado el dinamismo de estas áreas, esto no es suficiente, y es imprescindible tener acceso a información actualizada de forma periódica, lo que obliga a utilizar fuentes de fácil acceso y bajo coste.

Hasta la difusión de los métodos de teledetección para la toma de datos remota, los métodos directos de observación fueron, en cualquier ámbito de estudio (costa, tierra, mar), las únicas técnicas posibles que permitían obtener información del medio. A diferencia del estudio de la zona emergida de las áreas costeras, en la zona sumergida estos muestreos sistemáticos no se iniciaron hasta finales del siglo XIX; época en la que la nascente oceanografía se vio beneficiada de campañas oceanográficas como las lideradas por Alberto I de Mónaco que, en particular, estudiaron las costas cantábricas y atlánticas de Galicia.

Estos métodos directos pueden ser métodos de observación no invasivos (transectos de buceo, fotografía, etc.) y métodos de recolección o invasivos (recogida

de fauna o sedimentos, etc.). Muchas de estas técnicas pueden a su vez implementarse desde una embarcación (dragas Shipeck, dragas Van-Venn, *corers* hidráulicos, recolección de agua con botellas Niskin, mangas de plancton, etc.) o mediante buceadores (*corers* submarinos, cuadrados sobre el fondo, fotografía submarina, etc.)(Tabla 1.2).

Con este tipo de métodos se obtienen datos de alta calidad a un coste relativamente bajo (si exceptuamos el coste de la adquisición y mantenimiento de la embarcación). Sin embargo, su cobertura espacial es muy limitada, aumentando drásticamente los costes de tiempo y dinero cuando se pretende obtener una cobertura densa (o periódica). Aunque los métodos de observación directa siguen siendo todavía la única alternativa para ciertos tipos de estudios (recolección de muestras de fondo, por ejemplo), las técnicas remotas aportan la cobertura espacial continua (o muy densa) de la que carecen estos métodos, complementándolos o incluso sustituyéndolos en algunos casos.

Por lo general las técnicas remotas se basan en el estudio de una señal (onda) emitida o reflejada por el medio y recogida por un sensor. Cuando esta señal es una onda sonora se denomina **teledetección acústica** y cuando utiliza ondas electromagnéticas se denomina de teledetección óptica, teledetección por radar o teledetección por microondas, en función de las longitudes de onda involucradas. De entre estas tres últimas, **la teledetección óptica** es la más extendida y aplicada, debido a su capacidad para utilizar sensores pasivos (captar la onda emitida por el medio sin necesidad de que el sensor envíe una onda para ser reflejada).

La teledetección óptica nació en 1858, cuando se realizaron las primeras fotografías aéreas desde un globo aerostático (Fig. 1.2). Durante la II Guerra Mundial las fotografías tomadas desde aviones y avionetas fueron un elemento clave en la toma de decisiones. La teledetección óptica sobre plataformas espaciales comienza en la década de 1950 con la carrera espacial (en 1957 se envió el primer



Figura 1.2: Primera fotografía obtenida desde un globo aerostático por Gaspar Felix Tournachon en 1858. Se observa el pueblo de Petit-Becetre en Francia. Fuente: <http://ifoton.com>.

satélite al espacio, el Sputnik). En sus comienzos estas herramientas evolucionaron exclusivamente como aplicaciones militares (satélites espías), hasta que en los años 1970 comenzaron a funcionar los que se conocieron como satélites medioambientales (ERTS en 1972 y Landsat en 1975).

Los métodos de teledetección óptica más usuales (sensores instalados en plataformas espaciales) se caracterizan por obtener datos de forma periódica y homogénea, sin embargo desde sus inicios se han visto limitados por su elevado coste y por una escasa resolución espacial, lo que condiciona especialmente su aplicación en zonas costeras (Cracknell, 1999). Los sensores ópticos de teledetección aerotransportados (instalados en avionetas o helicópteros) tienen una resolución espacial mayor que los anteriores, sin embargo, carecen de su periodicidad y sus costes son mucho más elevados.

En los últimos años, gracias a los recientes avances (desarrollo de nuevos sensores más versátiles, mejora de la resolución espacial, etc.), a la disponibilidad de gran cantidad de datos (gracias a métodos de almacenamiento, transmisión y procesado más eficientes) y a las nuevas políticas de apertura de datos de las agencias espaciales (National Aeronautics and Space Administration, NASA, European Space Agency, ESA) y los diferentes programas nacionales (Plan Nacional de Teledetección, PNT, en España), los investigadores y técnicos han podido acceder a información remota de alta calidad de forma casi gratuita y constante, algo imposible hasta hace una década.

Ejemplo de estos avances tecnológicos y de las nuevas políticas de apertura de datos son los sensores hiperespectrales Hyperion y CHRIS/Proba (gestionados por United States Geological Survey, USGS, y la ESA respectivamente). Desde su puesta en funcionamiento, estos sensores han estado adquiriendo imágenes, a través de solicitudes previas, que han distribuido gratuitamente.

De este modo, las técnicas de teledetección óptica (sensores en satélites o sensores aerotransportados) se han convertido en una de las más importantes fuentes de información para la zona costera (Martínez *et al.*, 2007). Por ello, los trabajos enfocados a estudiar sus posibles aplicaciones se han multiplicado (véanse como ejemplo las revisiones de Cracknell (1999) y Malthus y Mumby (2003)), encontrándose nuevos usos para los que los sensores no fueron diseñados en su origen, como el estudio de masas de agua con sensores no oceanográficos (Gagliardini *et al.*, 2003; Domínguez Gómez *et al.*, 2010).

Estas técnicas de teledetección óptica se han utilizado en muchos estudios de la zona costera, con objetivos como conocer las características de la columna

de agua (Smyth *et al.*, 2001; Ruíz-Verdú *et al.*, 2005; Mélin *et al.*, 2007; Nykjaer, 2009; Sánchez-Carnero *et al.*, 2011), cartografiar el fondo marino (Kovach *et al.*, 2000; Lesser y Mobley, 2007; Casal *et al.*, 2011b; Casal *et al.* (2011a)), realizar el seguimiento de especies marinas invasoras (Gower y King, 2008), y de blooms de cianobacterias (Reinart y Kutser, 2006), monitorizar arrecifes de coral (Andréfouët *et al.*, 2001; Kutser *et al.* (2006)), gestionar pesquerías (Solanki *et al.*, 2003) o generar batimetrías (Gao, 2009) entre otras aplicaciones (ver Tabla 1.2).

Sin embargo, en las zonas sumergidas, su área óptima de trabajo está limitada por la capacidad de penetración de la longitud de onda utilizada, la cobertura nubosa y la rugosidad de la superficie marina (Vis *et al.*, 2003), lo que restringe su utilización a aguas claras y someras (McIntyre *et al.*, 2006). Las técnicas acústicas pueden cubrir las áreas costeras inaccesibles para la teledetección óptica.

Los métodos acústicos son técnicas remotas nacidas en 1917 para la detección de objetos sumergidos y la estimación de su distancia al observador. Al igual que en el caso de la teledetección óptica, los primeros sónares aparecieron en un contexto militar y fueron evolucionando para cubrir necesidades bélicas, especialmente durante la II Guerra Mundial.

Fuera del contexto militar estos dispositivos se han utilizado para la generación de batimetrías, sustituyendo a mecanismos más rudimentarios documentados ya en Egipto hace más de 4000 años y escasamente modificados hasta comienzos del siglo XX (Mayer, 2006) (Fig. 1.3). En la década de 1950 se popularizó el uso de sondas acústicas en embarcaciones no militares.

Décadas después, Orlowski (1984) publicó un trabajo en el que se introducía una metodología para la clasificación de fondos basada en la respuesta de una sonda acústica, iniciando una línea de trabajo que ha impulsado la evolución de los sensores acústicos y la definición de nuevas metodologías y aplicaciones.

Actualmente contamos con cuatro tipos principales de instrumentos acústicos (por orden

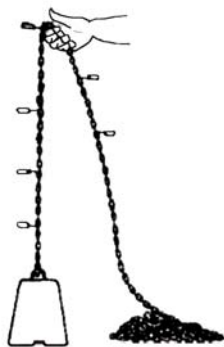


Figura 1.3: Escandallo: artefacto utilizado para el cálculo de la profundidad en un punto. Fuente: modificado desde <http://viajes.elpais.com>

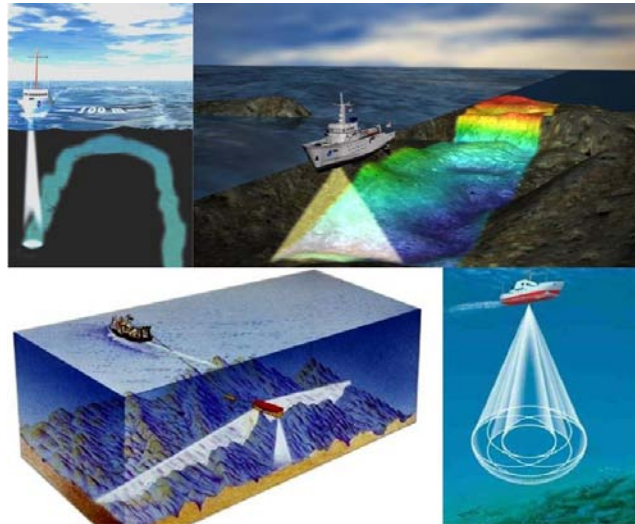


Figura 1.4: Esquema de funcionamiento de los diferentes tipo de sondas acústicas: monohaz (arriba, izquierda), multihaz (arriba, derecha), sonar de barrido lateral (abajo, izquierda) y sonda de haz partido (abajo, derecha). Fuentes: NOAA y National Oceanography Center Southampton.

de aparición): **sondas monohaz** (o *single beam*), que envían un único pulso que genera el transductor (instrumento que genera pulsos acústicos, ver sección 1.3), viaja por la columna de agua, rebota en el fondo y vuelve a ser recibido por el transductor; **sónares de barrido lateral** (o *sidescan sonar*), un tipo especial de sondas monohaz que envía hacia el fondo, con un ángulo de 65° , un haz acústico fino longitudinalmente y ancho transversalmente, permitiendo obtener datos de las estructuras presentes sobre el fondo; **sondas de haz partido** (o *split-beam*), que envían un haz partido en cuatro cuadrantes y utilizan las diferencias de tiempos en la llegada de cada una de estas partes del haz para inferir características del lugar de rebote; **sondas multihaz** (o *multibeam*), que envían un conjunto de haces acústicos muy estrechos simultáneamente, cada uno con un ángulo distinto, obteniendo así una cobertura continua del fondo y alta precisión vertical (Fig. 1.4).

Cada uno de estos sensores fueron diseñados con un objetivo concreto, aunque sus aplicaciones han sido variadas (ver Tabla 1.2). Las sondas monohaz

fueron diseñadas para realizar batimetrías, pero gracias a las mejoras en los transductores y en el procesado de la señal han sido utilizadas extensamente para clasificación de fondos bentónicos (Hamilton, 2001; vanWalree *et al.*, 2005; Brouwer, 2008). Los sónares de barrido lateral (SSS) fueron diseñados para la detección de objetos sobre el fondo (pecios, por ejemplo) sin embargo en la actualidad han sido aplicados a estudios de texturas del fondo (García-Gil *et al.*, 2000; McRea *et al.*, 1999), a cartografía de vegetación submarina (Pasqualini *et al.*, 2000), etc. Un caso especial de los sónares de barrido lateral es el de los SSS batimétricos, que utilizan dos haces acústicos para, mediante interferometría, calcular la distancia al fondo y así obtener datos batimétricos. Las sondas de haz partido fueron diseñadas para la detección precisa de objetos puntuales (o pequeños, en comparación con el frente de onda, como los peces) en los que el haz acústico rebota, e incluso de su dirección de desplazamiento, y especialmente para aplicaciones pesqueras. Sin embargo, actualmente se han aplicado también para generar batimetrías detalladas de fondos (Cutter y Demer, 2010). Las sensores más recientemente diseñados son las sondas multihaz (finales de los años 1970), las cuales nacieron para mejorar los cálculos batimétricos y la caracterización de fondos obtenidos con las herramientas anteriores (Preston *et al.*, 2001; Bourguignon *et al.*, 2009).

Existen otros tipos de dispositivos acústicos que, o bien por sus usos muy específicos o por su mecanismo de funcionamiento, no se clasifican junto con las sondas. Entre estos dispositivos se encuentran los *sound profilers*, utilizados para caracterizar la velocidad del sonido en la columna de agua (normalmente como complemento de las sondas multihaz), los *sub-bottom profilers*, utilizados para identificar y caracterizar las diferentes capas de sedimento del fondo (Harris y Beaman, 2003) y los *Doppler profilers*, utilizados para estudiar las corrientes de agua.

En lo que se refiere al estudio del área sumergida, la teledetección acústica tiene dos ventajas principales frente a la teledetección óptica: la escasa atenuación en la columna de agua, lo que les permite trabajar a grandes profundidades, y la capacidad para penetrar en el lecho marino, obteniendo así no solo datos de su superficie sino también de las características del sedimento que lo compone. Sin embargo, en la actualidad, existen todavía importantes limitaciones que no permiten que la comunidad científico-técnica saque de ellas todo el partido posible.

- Los costes de los dispositivos, que aunque experimentando una reducción, son todavía muy altos. Por poner dos ejemplos: la ecosonda más barata,

el SSS, cuesta en la actualidad alrededor de 10000 €; una ecosonda multibeam (no instalada en una embarcación oceanográfica) puede alcanzar más de 100000 €.

- La escasez de software libre y de metodologías abiertas obliga a la adquisición de paquetes comerciales, aumentando los costes, dificultando la popularización de estas metodologías y obligando a la especialización de los técnicos en cada uno de los diferentes softwares propietarios.
- El tiempo requerido para la cobertura completa de un área y los costes asociados hacen inviable la adquisición periódica de datos, además las políticas de gestión de la información de las instituciones responsables impiden en general la distribución gratuita de los mismos (al contrario de lo que sucede con los sensores espaciales). Ambas cuestiones complican el acceso de usuarios potenciales a los datos acústicos.

A medida que estas limitaciones se van reduciendo (descenso de costes, publicación de metodologías abiertas, interés de los organismos públicos, etc.), las herramientas de teledetección acústica han tomado más fuerza dentro de los trabajos de estudio de la zona sumergida de la costa, aportando alta cobertura espacial, homogeneidad en la toma de muestras, capacidad de repetición de la toma de medidas, etc. Como consecuencia, y al igual que ha sucedido en la teledetección óptica del medio marino, es de esperar que con la apertura de datos y la publicación de metodologías no dependientes de paquetes comerciales y/o replicables al ser abiertas, surjan nuevas aplicaciones que permitan explotar estos datos más allá de lo que ha sido hasta ahora posible.

Método	Herramienta	Rango aplica- ción	Coste	Cobertura espacial	Resolución espacial	Trabajos realizados
Obs. directa	Buceo	0 a 30m	Bajo	Baja	Alta	- Censos de peces (García-Chartón <i>et al.</i> (2004); Yasué <i>et al.</i> , 2010) - Censos de fauna bentónica (Hoffann y Dolmer, 2000; Hoffann y Dolmer, 2000) - Monitorización bosques de algas (Cambié <i>et al.</i> , 2009) - Estudios de granulometría con corers (Xu <i>et al.</i> , 2011) - Estudios de contaminación con corers (Ye <i>et al.</i> , 2011)
Obs. directa	Recogida de datos desde embarcación	0 a > km	Alto	Baja	Alta	- Análisis de sedimentos en estudios de impacto ambiental (Desprez, 2000) - Estudios arqueológicos (Gusick y Faught, 2011) - Estudios de productividad (Burns <i>et al.</i> , 2008; Johnston <i>et al.</i> , 2009)
Imagen remota	Teledetección espacial: Imagen multiespectral e hiperspectral	0 a 30 m (en función de la turbidez del agua)	Medio	Media/Alta	Media (metros o decenas de metros)	- Cartografía de algas (Casal <i>et al.</i> , 2011b) - Avance de dunas costeras (Hernández <i>et al.</i> , 2007) - Cartografía de fondos (Khan <i>et al.</i> , 1992; De Vel y Bour, 1990) - Estudio de la temperatura superficial del agua (Fisher y Mustard, 2004) - Características de la columna de agua (Doxaran <i>et al.</i> , 2002)
Imagen remota	Sensores aerotransportados: Imagen multiespectral e hiperspectral	0 a 30 m (en función de la turbidez del agua)	Medio	Media/Alta	Alta (de cm a metros)	- Cartografía de fondos (Thomson <i>et al.</i> , 1998) - Evaluación de los fondos de coral (Lesser y Mobley, 2007; Alquezar y Boyd, 2007) - Granulometría de las zonas intermareales (Rainey <i>et al.</i> , 2003)

Método	Herramienta	Rango aplica- ción	Coste	Cobertura espacial	Resolución espacial	Trabajos realizados
Imagen remota	Teledetección espacial: Sensores oceanó- gráficos	Capa superfi- cial de la columna de agua	Bajo	Alta	Media (de centenas de metros a kiló- metros)	- Cálculo de la productividad (Gregg y Casey, 2004) - Estudio de la temperatura superficial del mar (Nykjaer, 2009) - Seguimiento de procesos climatológicos (Behrenfeld <i>et al.</i> , 2006; Cunjin <i>et al.</i> , 2010; Henson <i>et al.</i> , 2010)
Imagen remota	Robots subma- rinos	0 a > 10 km	Medio	Baja	Media (de metros a decenas de metros)	- Estudios arqueológicos (White <i>et al.</i> , 2010) - Comportamiento de peces (Lorance y Trenkel, 2006) - Evaluación de stocks (Trenkel <i>et al.</i> , 2004) - Cartografía de fondos (Negahdaripour y Madjidi, 2003)
Ondas acústicas	Sondas mono- haz	0 a > 1km	Medio	Alta	Variable	- Estudio de batimetrías (Becker y Sandwell, 2008) - Clasificación de fondos (Hamilton, 2001; Freitas <i>et al.</i> , 2003) - Cartografiado de áreas de Maërl (De Grave <i>et al.</i> , 2000) - Relación fondos-stocks (Orlowski, 1998; Reid y Maravelias, 2001)
Ondas acústicas	Sonar de barrido lateral	0 a > 1km	Medio	Alta	Alta (de centíme- tros a metros)	- Estudios de textural del fondo (McRea <i>et al.</i> , 1999; García-Gil <i>et al.</i> , 2000) - Cartografía de vegetación submarina (Pasqualini <i>et al.</i> , 2000; Paul <i>et al.</i> , 2011) - Cartografía de áreas de explotación de bivalvos (Allen <i>et al.</i> , 2005) - Localización de minas submarinas (Reed <i>et al.</i> , 2003) - Estudio de masas de hielo (Wadhams, 1988) - Estudio de corrientes (Thorpe y Hall, 2003)
Ondas acústicas	Sondas de haz partido	0 a > 1km	Alto	Alta	Variable	- Evaluación de stocks (Rudstam <i>et al.</i> , 1999; Stanley <i>et al.</i> , 2000) - Caracterización de fondos (Reid y Maravelias, 2001) - Generación de batimetrías (Cutter y Demer, 2010) - Comportamiento de peces (Moszynski <i>et al.</i> , 2003)

Método	Herramienta	Rango aplica- ción	Coste	Cobertura espacial	Resolución espacial	Trabajos realizados
Ondas acústicas	Sondas multi- haz	0 a > 1km	Alto	Muy Alta	Muy alta (centí- metros)	- Generación de batimetrías (Galparsoro <i>et al.</i> , 2010) - Caracterización de fondos (Preston <i>et al.</i> , 2001; Bourguignon <i>et al.</i> , 2009).
Laser	Sensores Lidar	0 a 70 m	Alto	Alta	Muy alta (centí- metros)	- Generación de batimetrías (Galparsoro <i>et al.</i> , 2010) - Caracterización de fondos (Wedding <i>et al.</i> , 2008)

Tabla 1.2: Métodos de estudio del área submarina. Se presentan las herramientas más utilizadas caracterizadas por el rango de profundidades en el que son aplicables, su coste, su cobertura y resolución espacial y sus principales aplicaciones.

1.3. Las herramientas acústicas

Bases físicas

El objetivo de esta sección es revisar los conceptos de acústica submarina necesarios para entender cada una de las aplicaciones acústicas presentadas en los capítulos siguientes. Estos, debido a las limitaciones de extensión por su formato de artículo de revista, no abordan la teoría acústica que subyace a cada una de las aplicaciones.

Por otro lado, dado que este es un trabajo aplicado a la gestión costera, no dirigido a físicos sino a profesionales que trabajan en este campo (biólogos, geógrafos, oceanógrafos, etc.), se ha intentado que la exposición de esta sección sea sencilla, alejándose del habitual enfoque más matemático de los conceptos físicos. Este desarrollo se resume en secciones específicas.

Si se considera necesario, para profundizar más en las explicaciones que se presentan a continuación, pueden consultarse libros de divulgación como *Ondas en nuestro alrededor*, de Kádomtsev (1984) o los primeros capítulos de libros específicos de acústica submarina como *Principles of Underwater Sound* (Urick, 1975), *An Introduction to Underwater Acoustics* (Lurton, 2002) o *Sounds in the sea* (Medwin, 2005) .

¿Qué es una onda y como se propaga en el agua marina?

En la naturaleza podemos observar muchos procesos físicos repetitivos que se suceden cíclicamente en intervalos de tiempo fijos (traslación planetaria, por ejemplo). En todos estos casos hablamos de ***movimientos periódicos***, es decir, que quedan caracte-

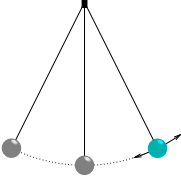


Figura 1.5: Esquema del movimiento oscilatorio de un péndulo.

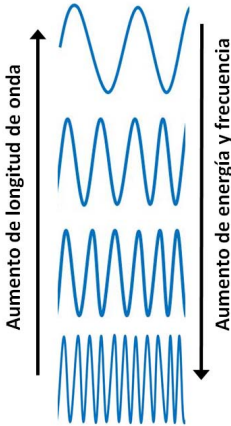


Figura 1.6: Ejemplo de ondas armónicas. Pueden observarse las frecuencias, longitudes de onda y amplitudes de las mismas.

rizados por su **período** (T) (tiempo que tarda en sucederse un ciclo completo) o por su **frecuencia** (f) (número de ciclos que se suceden por unidad de tiempo).

Un caso concreto del movimiento periódico es el del **movimiento oscilatorio**, es decir, aquel en el que el sistema físico oscila alrededor de una posición de equilibrio estable. Es el caso por ejemplo de un péndulo, que oscila de un lado al otro pasando por su posición de equilibrio (Fig. 1.5). Cuando este movimiento produce una transmisión de energía en el espacio se denomina **movimiento ondulatorio** u **onda**, es decir, la propagación de una perturbación en un punto a través de un medio. Por ejemplo, si preparásemos una fila de fichas de dominó en la que cada pieza estuviese anclada al suelo con un muelle, al empujar la primera cada una de ellas iría empujando la siguiente, transmitiendo una perturbación a lo largo de la fila, y volviendo a su posición inicial gracias al muelle. Este tipo de movimientos transmite energía (la perturbación) pero no realiza transporte de materia (cada elemento termina en la misma posición de equilibrio donde comenzó gracias al muelle).

Si esta onda tiene una **frecuencia** (f) y **longitud de onda** (λ) (distancia recorrida por la onda mientras una partícula realiza una oscilación completa) definidas y constantes se denomina **onda armónica**. (Fig. 1.6).

Cuando la perturbación propagada afecta a los campos magnético y eléctrico (la luz, las ondas de radio, etc.) se denominan **ondas electromagnéticas**. Cuando la perturbación afecta al movimiento de los elementos de un medio (el agua que se desplaza en círculos cuando tiramos una piedra a un estanque,

etc.) se denominan **ondas mecánicas**. La teledetección óptica (sensores sobre satélites, fotografía, etc.), por ejemplo, se basa en la transmisión de ondas electromagnéticas a través del aire o el vacío (la luz es una onda electromagnética). Las ondas sísmicas producidas en los terremotos son un ejemplo de onda mecánica. El desplazamiento del medio que provocan es responsable de los daños producidos por estos eventos.

Según la dirección en la que las ondas mecánicas hacen oscilar las partículas del medio puede tratarse de **ondas longitudinales**, aquellas en las que el movimiento de oscilación de las partículas es paralelo a la dirección de propagación (las fichas de dominó con muelles, por ejemplo), también llamadas **ondas de presión** u **ondas de compresión** (por el efecto que producen en el medio) (Fig. 1.7), o de **ondas transversales**, aquellas en las que el movimiento de oscilación de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación (las ondas que se forman al batir una cuerda, por ejemplo) (Fig. 1.8) que se propagan únicamente en medios sólidos.

A diferencia de las ondas mecánicas que se producen al batir una cuerda, en las que existe un desplazamiento perceptible de masa (las secciones de la cuerda se mueven), cuando las ondas mecánicas provocan movimientos muy pequeños en el medio (a nivel de moléculas) se denominan **ondas acústicas** u ondas de sonido. Este tipo de ondas se generan a partir de una fuente de sonido (vibraciones de pequeña amplitud) como un altavoz, por ejemplo. En los fluidos (como la columna de agua) el sonido es transmitido como una onda longitudinal que provoca a su paso la compresión y expansión del medio, a través de la aproximación y alejamiento de las partículas que lo

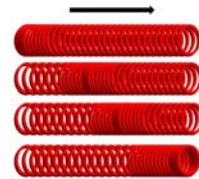


Figura 1.7: Onda longitudinal que se propaga en un muelle.

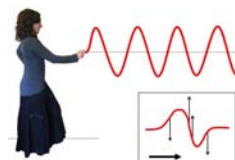


Figura 1.8: Onda transversal que se genera al batir verticalmente una cuerda.

componen (en la dirección de avance de la onda), permitidas gracias a la elasticidad (compresibilidad) de este medio.

A medida que la perturbación de la onda sonora va avanzando provoca movimientos en las partículas alrededor de su posición de equilibrio. Al estado de movimiento en el que se encuentra una partícula en un instante de tiempo debido al paso de la onda se le llama *fase*. Es decir, todas aquellas partículas que estén realizando exactamente el mismo movimiento debido a la onda se encontrarán en la misma fase.



Figura 1.9: Ondas circulares que se observan en una superficie de agua al lanzar una piedra. Fuente: Nacho Rubiera y Angélica Soleiman (B19)

Al tirar una piedra a un estanque, por ejemplo, las ondas concéntricas se van alejando del punto donde la piedra cayó, describiendo círculos en los que todas las partículas están igualmente afectadas por la onda en un momento dado, todas las del círculo están en el mismo instante en la cresta, momentos después todas están en la depresión tras la cresta, etc. (Fig. 1.9). Esto se denomina *frente de onda*: conjunto de partículas contiguas unas de otras que se encuentran en el mismo estado de perturbación, en la misma fase.

El ejemplo anterior, de una onda propagándose por la superficie del agua, describiría un frente de onda circular. Cuando este conjunto de partículas se disponen describiendo la superficie de una esfera, que se desplaza en todas direcciones desde el punto de origen de la perturbación, se denominan *ondas esféricas*. Este es el caso más frecuente de las ondas sonoras con las que nos encontraremos (Fig. 1.10).

Los altavoces de una radio o una televisión, o nuestras cuerdas vocales, son algunos de los sistemas de generación de ondas sonoras que conocemos y utilizamos a diario. En acústica submarina los sistemas generadores de sonido más utilizados en la actualidad son los *transductores piezoeléctricos*. Estos

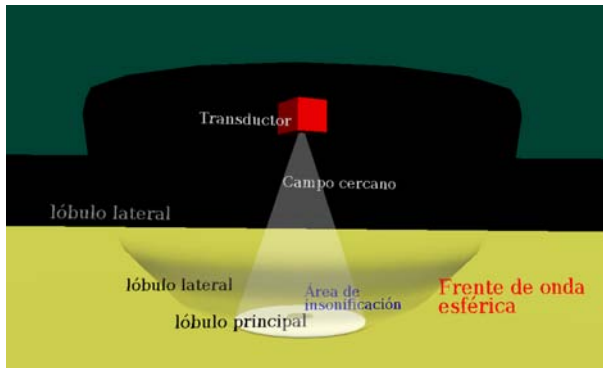


Figura 1.10: Propagación de una onda sonora (esférica) a partir de su punto de origen

instrumentos contienen una o más piezas, normalmente de cerámica, que se contraen y expanden (es decir, vibran) al pasar una señal eléctrica por ellas e, igual que sucede al vibrar nuestras cuerdas vocales, emiten un sonido a una determinada frecuencia.

Igual que en las cuerdas de una guitarra, en la que cada una de ellas debido a su grosor y longitud emite un sonido determinado, las piezas de los transductores emiten un tipo de sonido con una frecuencia determinada por sus dimensiones (particularmente, por su espesor). Siguiendo con la analogía de la guitarra, cuando se puntea una cuerda, acortando su longitud (punteando más lejos del clavijero) el sonido es más agudo; igual sucede al disminuir el espesor de las piezas del transductor. Por ello, si un transductor quiere emitir más de un sonido, debe tener generalmente más de un grupo de piezas (Fig. 1.11).

Las **sondas acústicas** son sistemas formados por un procesador, un sistema de generación de impulsos eléctricos o transeceptor y un transductor (Fig. 1.12), aunque comunmente la palabra *sonda* hace referencia únicamente al transeceptor. Un tipo concreto de

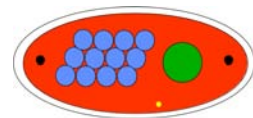


Figura 1.11: Esquema de transductor hidroacústico de dos frecuencias. En azul las piezas cerámicas que generan ondas de 200 kHz y en verde la que genera ondas de 38 kHz. Fuente: Simrad S.L.

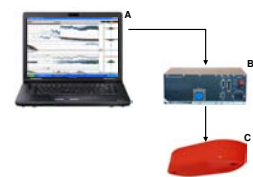


Figura 1.12: Esquema de sonda acústica. A) ordenador, B) transeceptor, C) Transductor.



Figura 1.13: Paquete de ondas emitidas por un transductor en un tiempo τ .

sondas acústicas son las sondas científicas (ver sección 1.3), en las que el usuario define mediante un software de control instalado en un ordenador portátil el tipo de onda que desea y este envía la orden al transceptor, que genera señales eléctricas que envía al transductor, haciendo vibrar sus piezas y generando sonidos de una frecuencia y duración determinados (es decir, con un número concreto de ciclos) (Fig. 1.13). A estos *paquetes de ondas* se los denomina *pings*.

La frecuencia que queremos generar para este paquete de ondas se denomina **frecuencia portadora** de la señal acústica. Pero en el proceso de vibración a través del cual se genera el paquete de ondas, el transductor produce irremediamente otras frecuencias superiores (múltiplos enteros de la portadora), llamados armónicos. El rango de las frecuencias que transportan la mayor parte de la energía del paquete de ondas se denomina ancho de banda del pulso. Es decir, si en un paquete de ondas la mayor parte de la energía se debe a la frecuencia portadora este pulso será de banda estrecha, en caso de que convivan muchas frecuencias será de banda ancha.

Dado que la generación de armónicos va unida al comienzo y fin de la generación del pulso, cuanto más largo sea este menor proporción de armónicos tendrá (menos ancho de banda), por lo que el pulso será más puro (situación deseable ya que la frecuencia influye en muchos de los procesos de interacción de la onda, como por ejemplo la absorción, que la sufren más las frecuencias armónicas que la portadora, produciéndose mayores pérdidas de energía si éstas están presentes). Sin embargo la longitud del pulso generado también determinará la resolución vertical de los datos recibidos de un rebote (a mayor longitud de pulso menor resolución) por lo que es necesario llegar a un equilibrio entre ambas variables: un ancho de banda suficientemente estrecho para que todos los proce-

Los acústicos se produzcan a una misma frecuencia (en particular, la emisión y la recepción de la onda) y una longitud de pulso que permita localizar con precisión el origen de los rebotes. Habitualmente los fabricantes de transductores establecen unos límites de longitudes de pulso dentro de los cuales el ancho de banda de emisión y de recepción proporcionan una buena calidad de la señal emitida y recibida.

Normalmente el usuario de una sonda acústica no solo define la duración del ping, sino también su cadencia (cada cuánto se emite) y su potencia (cantidad de energía eléctrica generada por el transceptor que será utilizada para generar el pulso acústico). De nuevo, existe un equilibrio a la hora de seleccionar la potencia: debe ser suficientemente alta para que la señal recibida se distinga del ruido de fondo, pero no debe ser tan elevada para que la inercia del agua que hace oscilar la onda induzca nuevas frecuencias (nuevos armónicos) a las que se transfiera parte de la energía.

Estos pings viajan por la columna de agua, rebotan en el fondo (o en obstáculos que se encuentren por el camino), y vuelven al transductor que las convierte de nuevo en una señal eléctrica que envía a la sonda. Si suponemos que en el medio de propagación de la onda, la columna de agua, no se producen procesos que provoquen una pérdida de energía, la energía inicial (transmitida del transductor al medio) se conservará.

Es decir, el paquete de onda, cuando la onda tenga un radio r_1 , transportará la misma energía que cuando la onda esférica tenga radio r_2 , aunque r_2 sea mucho mayor que r_1 . Esto quiere decir que a medida que la onda se separa de su punto de generación su superficie esférica crece y por tanto, la intensidad (energía transportada por unidad de área y tiempo) en cada punto del frente de onda decrecerá. A este efecto se le denomina atenuación geométrica o

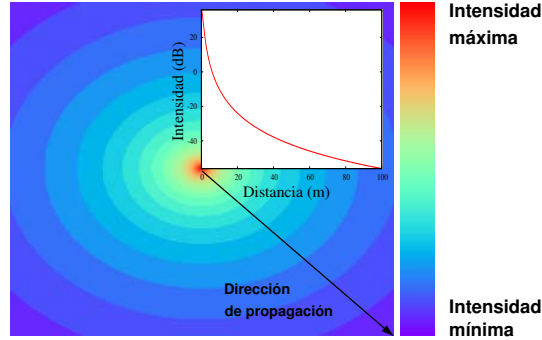


Figura 1.14: Atenuación de la intensidad de una onda esférica a medida que se aleja de su fuente: spreading.



Figura 1.15: Atenuación del ladrido emitido por un perro.

spreading (Fig. 1.14 y Fig. 1.15) y actúa en la onda independientemente de su frecuencia.

Sin embargo, la propagación del sonido lleva siempre implícita una disminución en la energía del paquete de onda en el transcurso de la propagación de la onda esférica, que se manifiesta en una transferencia de calor. Esta atenuación es debida principalmente a dos mecanismos: la *disipación viscosa* y la *relajación química*.

La disipación viscosa responde a la pérdida de energía que sucede al mover unas partes del fluido respecto a sus vecinas, para lo cual es necesario realizar el trabajo de vencer las fuerzas viscosas del medio. Esta pérdida de energía es proporcional al cuadrado de la frecuencia (frecuencias más altas hacen moverse a las partículas con más velocidad y provocan más fricción, produciendo más pérdida de energía).

Se denomina relajación química al proceso por el cual algunas moléculas pierden su equilibrio químico al ser perturbadas por una onda de presión, que invierte parte de la energía que transporta en desplazar dicho equilibrio. Este proceso no es igual para todas las

moléculas, ya que cada tipo de molécula tiene una frecuencia crítica por debajo de la cual se produce la relajación química y con ella la absorción de energía.

En el agua de mar hay dos componentes principales responsables de la pérdida de energía por relajación química: el ácido bórico (afecta principalmente a frecuencias bajas, del orden de decenas de kHz) y el sulfato de magnesio (afecta a frecuencias intermedias, del orden de 100 kHz). En el agua de mar este proceso es el responsable de la mayor parte de la atenuación del sonido en el mar (Medwin, 2005).

De este modo, en su avance por la columna de agua, la onda sufre una pérdida progresiva de energía hasta que la intensidad de su frente de onda es indistinguible por el transductor del ruido de fondo.

Ecuaciones relacionadas con los conceptos definidos en el apartado 1.3

Algunos de los conceptos explicados en el apartado anterior (ver sección 1.3) se relacionan entre sí e intervienen en las siguientes ecuaciones:

Relaciones de frecuencia, periodo y longitud de onda:

$$f = \frac{1}{P}; \lambda = \frac{v}{f} \quad (1.1)$$

siendo f la frecuencia de la onda, P el periodo, λ la longitud de onda y v la velocidad de desplazamiento de la onda. Para nuestras frecuencias de trabajo habituales, 38 kHz y 200 kHz, las longitudes de ondas utilizadas serán de 4,2 cm y 0,8 cm, respectivamente.

Spreading: La intensidad en un punto del frente de onda situado a una distancia r_i del punto de origen r_0 , será

$$I_i = \frac{I_0 r_0^2}{r_i^2} \quad (1.2)$$

siendo I_0 la intensidad medida a una distancia de referencia r_0 .

Nivel de intensidad (escala logarítmica, dB): Dado que la intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia (ec. 1.2) los valores tornan rápidamente a cantidades muy pequeñas, poco cómodas para trabajar. Para evitar las molestias causadas por estas cantidades se introduce la escala decibélica, que se basa en los logaritmos de las intensidades relativas a una intensidad de referencia I_{ref} .

$$I_{dB} = 10 \log (I/I_{\text{ref}}) \quad (1.3)$$

Absorción: Si añadimos el término de atenuación debida a los procesos de absorción viscosa y relajación química, a la ecuación de la intensidad en un punto situado a una distancia r_1 de su distancia de referencia (ec. 1.2) obtenemos:

$$I_i = I_0 r_0^2 \frac{e^{-\beta r_i}}{r_i^2} \quad (1.4)$$

siendo β el coeficiente de absorción, medido en metros inversos (m^{-1}), que depende de la frecuencia (f) y de las características del medio (temperatura (T), pH , etc.)

Por motivos prácticos se utiliza el coeficiente α_ω , medido en dB/km, siendo la relación entre ambos de

$$\beta = \frac{\log 10}{10000} \alpha_\omega \quad (1.5)$$

Según Ainslie & McColm (1998), α quedaría definida como

$$\begin{aligned} \alpha(f, T, r_\alpha, pH) = & 0,106 \frac{f_1 f^2}{f^2 + f_1^2} e^{(pH-8)/0,56} + 0,52 \left(1 + \frac{T}{43}\right) \left(\frac{S}{35}\right) \frac{f_2 f^2}{f^2 + f_2^2} e^{-z/6} \\ & + 0,00049 f^2 e^{-(T/27+z/17)} \end{aligned} \quad (1.6)$$

siendo $\alpha(f, t, r_\alpha, pH)$ el coeficiente de absorción medido en dB/km, f la frecuencia de la onda, T la temperatura del agua en grados Celsius, pH el pH del agua de mar, r_α la profundidad de referencia (a la que se está determinando el coeficiente de absorción) en metros, S la salinidad en ‰ y f_1 y f_2

$$f_1 = 0,78 (S/35)^{1/2} e^{T/26} \quad (1.7)$$

$$f_2 = 42 e^{T/17} \quad (1.8)$$

El primer término de la ecuación de $\alpha(f, t, r_\alpha, pH)$ describe la atenuación debida al ácido bórico, el segundo al sulfato de magnesio y el tercero depende de la viscosidad del medio (que depende a su vez de la temperatura).

Por ejemplo, si un transductor emite dos ondas, una con frecuencia de 38 kHz y otra de 200 kHz, suponiendo que cuando la onda está separada 1 m del transductor su intensidad en un punto del frente de onda sea (en ambos casos) $3980W/m^2$ (36 dB), 10 m después la intensidad será de $38,06W/m^2$ (15,8 dB) para 38 kHz y $29,78W/m^2$ (14,74 dB) para 200 kHz y cuando la onda se haya separado 100 m del transductor las intensidades serán de $1,27W/m^2$ (1,04 dB) y $0,37W/m^2$ (-4,28 dB) respectivamente (suponiendo una temperatura de 13° y salinidad de 35 ‰).

Ecuación del sónar: Describe el comportamiento de una onda acústica que se propaga en un medio fluido y resume las expresiones anteriores para la emisión y para la recepción de la onda acústica en una única suma de intensidades expresadas en escala logarítmica (se beneficia de que el producto de dos magnitudes se convierte en una simple suma en escala logarítmica),

$$EL = SL - TL \quad (1.9)$$

siendo EL el nivel de energía que recibiría otro transductor colocado a una distancia r_i del que la emite, SL el nivel energético de la fuente de sonido *source level* (en el transductor bifrecuencia utilizado en este trabajo, por ejemplo, 219 dB y 227 dB relativos a $1 \mu Pa$ para 38 kHz y para 200 kHz respectivamente) y TL la pérdida de energía debida a la propagación de la onda hacia el transductor receptor, incluye las pérdidas por atenuación geométrica o spreading y la atenuación.

$$TL = 20 \log(r_i/r_0) + \alpha(r_i/r_0) \quad (1.10)$$

siendo habitualmente $r_0 = 1$ y omitiéndose de la ecuación.

$$TL = 20 \log(r_i) + \alpha(r_i) \quad (1.11)$$

Interacción de la onda acústica con un obstáculo físico

Si la onda acústica esférica descrita en el apartado anterior (sección 1.3) no encuentra en su camino ningún obstáculo y el medio permanece aproximadamente homogéneo, continuará su propagación hasta su atenuación total.

Entendemos por **obstáculo físico**, una superficie límite de dos medios de distintas propiedades (agua-fondo, agua-pezu, agua-aire, agua-casco de un barco, etc.) o de un mismo medio con características no homogéneas (dos masas de agua con diferencias de temperatura y densidad).

En los casos de estudio que se abordan en este trabajo, la onda acústica es generada por el transductor en las capas superficiales del agua, y enviada hacia el fondo. Al trabajar en las aguas costeras más someras (hasta ~ 50 m de profundidad) podemos asumir que no existen grandes cambios verticales en las masas de agua que las forman (o, dicho de otro modo, que el medio es homogéneo). Por lo tanto nos centraremos en los obstáculos que se encuentran en el medio (y no lo constituyen). Por simplificar, y para explicar los procesos que tienen lugar cuando una onda acústica interactúa con un obstáculo, observaremos qué sucede cuando la onda (enviada verticalmente desde la superficie del agua) llega en su avance a la superficie del fondo marino, ya que el comportamiento será análogo en los otros casos (peces, vegetación, boyas, etc.).

La onda que se genera en el transductor es una onda esférica con un cierto "grosor". Podríamos imaginarla como media naranja vacía, donde la piel de la naranja es más o menos gruesa en función de la longitud de pulso de la onda (cuanto más corto sea el pulso, menos gruesa será la piel).

Cuando esta onda llega a la superficie del fondo lo hará en primer lugar en el punto de la vertical desde el transductor (Fig. 1.16). A medida que la onda continúa avanzando y la superficie del fondo interactúa con el interior de la *piel de la naranja*, el punto de insonificación (la huella de la onda sobre el fondo) se va convirtiendo en un círculo cada vez de mayor tamaño. En el momento en el que se haya superado el “grosor” de la onda, cuando el punto inicial de insonificación esté en el interior de la media naranja, la huella se convertirá en un anillo.

Para estudiar los procesos que tienen lugar cuando la onda interactúa con el fondo, supondremos para simplificar que nuestra onda está formada por un conjunto de rayos, cada uno de ellos actuando sobre un punto de su frente de onda (Fig. 1.17). Es decir, como si en cada punto de la superficie de la onda hubiese un rayo dirigido desde el centro de la esfera que ocupase todo el *grosor* de la onda.

Cuando uno de estos rayos llega a la superficie del fondo se dividirá; parte del mismo continuará su trayecto a través del sedimento (refracción), otra parte rebotará de nuevo hacia la columna de agua (reflexión) y una tercera parte se disipará.

Se llama **refracción** al proceso por el cual las ondas, al pasar de un medio a otro, sufren una desviación

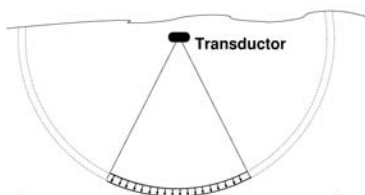


Figura 1.17: Rayos contenidos en una onda esférica.

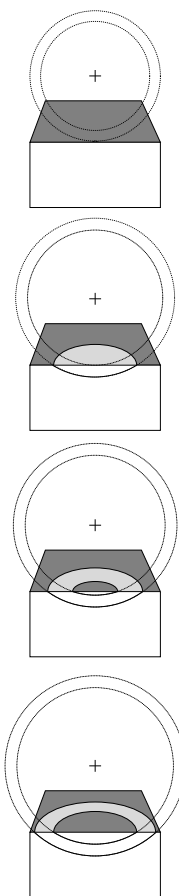


Figura 1.16: Esquema del área del fondo insonificada a medida que avanza la onda.

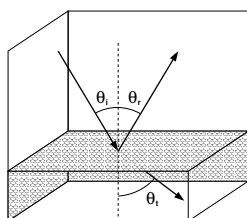


Figura 1.18: Reflexión y refracción de una onda en una superficie. Ley de Snell.

en la dirección de su propagación (Fig. 1.18). Esta desviación se debe al cambio que la onda sufre en su velocidad de propagación en el paso de un medio a otro. En el fenómeno de refracción, los senos de los ángulos de contacto de las ondas incidente y refractada con la superficie son proporcionales a la velocidad de propagación de las mismas en sus correspondientes medios. La **reflexión** es el proceso por el cual las ondas rebotan en la superficie de transición entre dos medios distintos. El ángulo con la normal con el que rebota esta onda es igual al ángulo de la onda incidente, de modo que si una onda sonora incide perpendicularmente sobre una superficie reflejante, vuelve sobre sí misma. Estos dos comportamientos se recogen en las leyes de reflexión y de refracción o de **Snell** (Fig. 1.18).

La cantidad de energía acústica que pasa de un medio a otro en el proceso de refracción (y, por lo tanto, la cantidad que es reflejada) viene determinada por la diferencia en las propiedades mecánicas que provocan que el medio “se resista” a producir la oscilación que requiere la onda para su propagación. Estas propiedades se resumen en la **impedancia acústica** del medio, que depende de la densidad del medio (cuanto más grande, más impedancia presenta) y de su elasticidad (cuanto más rígido es, mayor impedancia). Una onda acústica que cruza la frontera entre dos medios con impedancias acústicas similares (entre agua y arena, por ejemplo), se transmite casi en su totalidad. Una onda acústica que cruza la frontera entre dos medios con impedancias acústicas muy distintas (agua y aire), sufre una reflexión muy grande (y, por lo tanto, casi no se transmite).

Dejando de lado temporalmente la refracción, y siguiendo con el símil de los rayos, con la llegada del frente de onda al fondo marino cada uno de estos rayos incidirá en la superficie con un ángulo diferente. Así, cada uno de ellos producirá un nuevo rayo re-

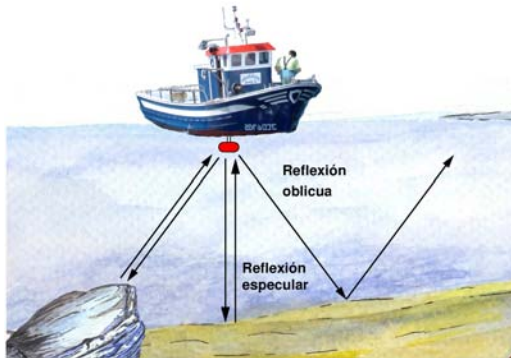


Figura 1.19: Tipos de reflexiones que se producen en la onda sonora que llega al fondo desde el transductor

flectado, que ascenderá por la columna de agua, en dirección hacia el transductor o fuera del mismo, dependiendo del ángulo de incidencia y de la topografía del fondo (Fig. 1.19).

Cuando uno de estos rayos reflejados llegan al transductor su energía es recogida por él, y convertida en una señal eléctrica que el transceptor amplifica y el ordenador registra. El conjunto de señales recogidas por cada ping que se ha enviado al fondo, es decir, la secuencia temporal de rayos rebotados hacia el transductor de un frente de onda, se conoce como **eco**.

Al estudiar la forma del eco se diferencian dos secciones principales: un pico de intensidad inicial, debido al rebote especular de la onda, denominado *área de ataque*, seguido de un área de intensidades en descenso denominada *cola*, debida a los rebotes de los rayos oblicuos que vuelven al transductor (Fig. 1.20).

El recorrido de la onda no termina cuando es recibida por el transductor. Cada uno de los rayos que fueron reflejados en el fondo asciende hasta la super-

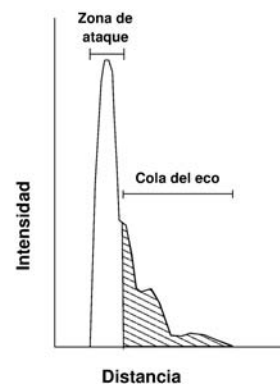


Figura 1.20: Partes de un eco recibido en un transductor al rebotar una onda sonora en el fondo.

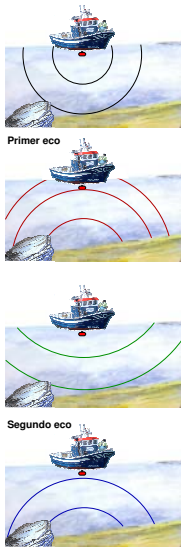


Figura 1.21: Esquema de la trayectoria de la onda a través de la columna de agua. Se muestran el primer rebote en el fondo recogido por el transductor, la reflexión en la superficie y el segundo rebote en el fondo que es recogido por el transductor.

ficie del agua donde, debido a la gran diferencia de impedancias entre agua y aire, sufren un proceso de reflexión en el que prácticamente toda la energía que llega a la superficie del agua vuelve hacia el fondo. Estos rayos procedentes de la superficie sufren los mismos procesos al llegar al fondo que los originales (procedentes del transductor), siendo reflejados de nuevo hacia la superficie. El transductor registra este segundo rebote, denominado **segundo eco** (Fig. 1.21).

Las características del primer eco dependen, principalmente, de la topografía del fondo. En un fondo plano el eco tendrá valores muy altos de energía en su inicio, correspondientes a la reflexión especular en la dirección vertical (Hamilton, 2001), que van disminuyendo a medida que nos alejamos del punto central de la huella de la onda sobre el fondo. Un fondo accidentado, con caras orientadas en distintas direcciones, contará con valores más bajos en el comienzo del eco (Fig. 1.22). De este modo, la observación de la forma del eco nos aporta información de las características del fondo.

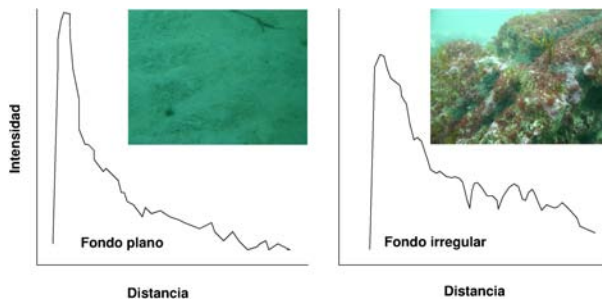


Figura 1.22: Ejemplo de ecos recibidos en el transductor, correspondientes al rebote de un ping en un fondo plano (a) y un fondo irregular (b)

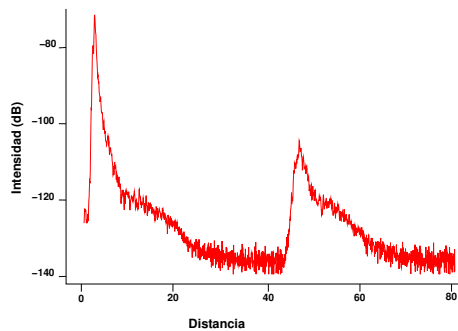


Figura 1.23: Primer y segundo ecos recibidos en un transductor

El segundo eco está muy ligado al estado del mar (a las características de la superficie agua-aire con la que rebota), que definen el ángulo de incidencia con el que alcanzarán el fondo, por lo que sus características no aportan necesariamente información de la topografía del fondo (Heald y Pace, 1998).

El proceso de reflexión entre ambas superficies (agua-aire y agua-fondo) se replica hasta que la atenuación disminuye lo suficiente la energía de la onda como para que no sea discernible del ruido ambiente, algo que en profundidades menores a 50 m y frecuencias medias sucede después del segundo eco (Fig. 1.23).

Hasta aquí se han descrito los procesos que tienen lugar debido a la reflexión de la onda, pero como se explicó anteriormente, la reflexión no es el único proceso que tiene lugar cuando la onda incide en el fondo. Parte de esta continúa su camino penetrando en el sedimento (refracción). De forma ideal podemos suponer que el sedimento está formado por capas homogéneas y en cada uno de los límites de éstas, la onda volverá a sufrir reflexión y refracción. La onda reflejada en cada una de estas capas ascenderá, primero hasta la interface sedimento-agua, y después

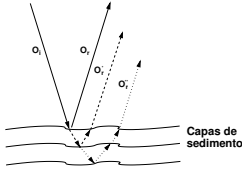


Figura 1.24: Penetración de una onda incidente en el sedimento (α_i) y rebote hacia el transductor desde la superficie de la onda reflejada por la superficie (α_r), la onda reflejada en la primera capa de sedimento (α'_r), y la onda reflejada en la segunda capa de sedimento (α''_r).

por la columna de agua hasta el transductor (Fig. 1.24). Estas ondas se superpondrán en el transductor a las que se reciben por la reflexión de la onda en la superficie. En el eco esto se observa después del máximo, como un aumento de los valores de energía, y el retraso es debido al tiempo invertido en la penetración en la primera capa y en la reflexión hasta la superficie (Fig. 1.25). Cuando mayor sea la diferencia de impedancias entre capas mayor cantidad de energía será reflejada y menor refractada.

Así, estudiando la forma y valores energéticos de los ecos recibidos en el transductor, será posible inferir algunas características del fondo oceánico (dureza, rugosidad, estructura del sedimento, etc).

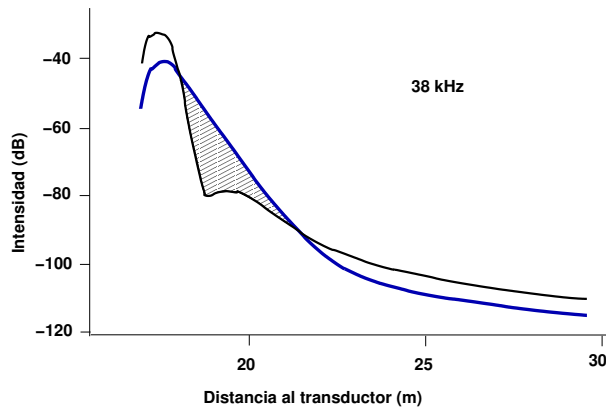


Figura 1.25: Ecos obtenidos mediante un modelo de reflexión. Se representa un eco sin penetración en el sedimento (en negro) y uno con penetración (en azul). Se dibuja sombreada el área correspondiente a la penetración.

Ecuaciones relacionadas con los conceptos definidos en el apartado 1.3

Índice de refracción: es una medida que determina la reducción de la velocidad de una onda cuando se transmite en un medio. Está definido como

$$n_1 = \frac{v_0}{v_1} \quad (1.12)$$

donde v_0 es la velocidad de la onda en el medio de referencia (en nuestro caso, en el agua), y v_1 es la velocidad de la onda en el medio de propagación.

Ángulo crítico: es el ángulo mínimo de incidencia a partir del cual no se produce refracción en una superficie, y toda la onda es reflejada (Fig. 1.26). Este ángulo depende de los índices de refracción de los medios en contacto. Solo se puede producir reflexión total si el índice del medio en el que se propaga la onda es superior al índice del medio con el que contacta (el índice de refracción del agua es mayor que el índice de refracción del sedimento, en nuestro caso).

El valor del ángulo crítico es

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1.13)$$

donde θ_c es el ángulo crítico, medido en grados, y n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios de propagación inicial (n_1) y de contacto (n_2).

Ley de Snell: definida por el matemático holandés Willebrord Snell van Royen, es la ley que define las relaciones entre el ángulo de incidencia de una onda en una superficie y el ángulo de refracción, en función de sus índices de refracción (Fig. 1.26).

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.14)$$

donde θ_1 es el ángulo de incidencia en la superficie de contacto, con respecto a la normal, y θ_2 es el ángulo con el que se propaga la onda refractada.

Ecuación del sonar: describe el comportamiento de una onda acústica que se propaga en un medio fluido. A partir de la ecuación 1.9, se añade el término debido al rebote en el fondo, así como las pérdidas sufridas en la ascensión de la onda hacia el transductor,

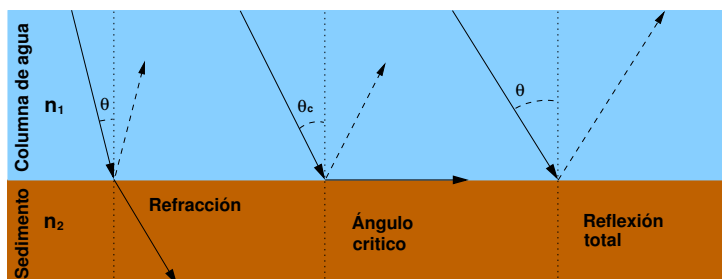


Figura 1.26: Comportamiento de una onda en función de su ángulo de incidencia

$$RL = SL - 2TL + TS \quad (1.15)$$

donde TS (*target strength*) define la fuerza con la que una onda rebota, es reflejada, en una determinada área. El TS depende de la superficie donde se produce la reflexión, y se define como

$$TS = 10 \log \left(\frac{I_{bs}}{I_i} \right) \quad (1.16)$$

donde I_i es la intensidad de la onda incidente y I_{bs} es la intensidad de la onda reflejada (*backscattered*).

Equipo acústico

Como se explicó en la sección anterior (1.3), el equipo necesario para realizar estudios de acústica submarina consta principalmente de 3 instrumentos: un transceptor, un transductor y un ordenador; a los que es necesario añadir un dispositivo GPS si se quiere obtener datos georreferenciados.

El transceptor y el transductor (o transductores) con el que trabaja son los instrumentos que definirán el tipo de datos acústicos que se podrán obtener. El tipo de ondas que genera (atendiendo a su frecuencia, forma y tamaño) dependerán principalmente del transductor utilizado, del tipo de piezas que haga vibrar (ver 1.3) y de su ángulo de apertura (que define el cono en el cual se concentra la mayor parte de la energía de la onda) (Fig. 1.27).

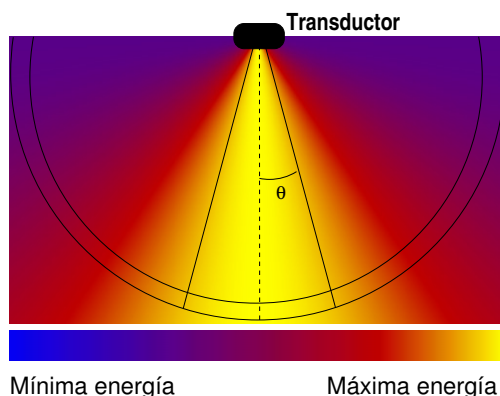


Figura 1.27: Esquema de concentración de energía dentro de la onda esférica.

Usualmente, al conjunto formado por estos dos elementos se lo denomina **sonda acústica** (a partir de ahora simplemente sonda o ecosonda). Actualmente existen cuatro tipos principales de ecosondas: sondas monohaz (*singlebeam*), sónar de barrido lateral (*sidescan sonar*), sondas de haz partido (*splitbeam*) y sondas multihaz (*multibeam*).

Con el mismo funcionamiento que las sondas batimétricas más sencillas (las utilizadas a diario por las embarcaciones recreativas o los pequeños barcos pesqueros), las sondas científicas monohaz se diferencian de las anteriores en la capacidad de variar las características del ping enviado (potencia, longitud de pulso, ...) así como en su capacidad de almacenamiento. Estas opciones permiten al usuario adaptar las características de la onda al estudio que quiere llevar a cabo y recoger la respuesta del fondo (o de cualquier otro elemento de la columna de agua) para su posterior tratamiento.

Las sonda monohaz y el sonar de barrido lateral (un tipo concreto de sonda monohaz) trabajan con el mismo tipo de transceptor, variando solo el transductor. La primera trabaja con transductores que emiten pulsos donde la energía se distribuye simétricamente con respecto a la vertical (los ángulos de apertura transversal y longitudinal son iguales o similares). Los transductores de los *sidescan sonar* en cambio envían ondas hacia el fondo con direcciones oblicuas, y cuentan con amplios ángulos transversales y muy estrechos longitudinales (con respecto al avance de la embarcación), por lo que la energía se concentra en una franja ancha transversal (Fig. 1.28).



Figura 1.28: Huella del SSS sobre el fondo en el área de concentración de energía. Fuente: modificado de Sides-cansonar © Wessex Archaeology.

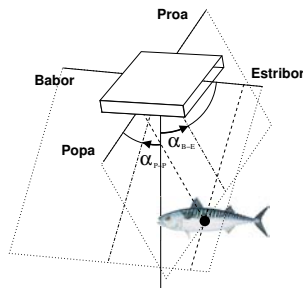


Figura 1.29: Esquema de un transductor de haz partido.

Las sondas de haz partido utilizan transductores que envían verticalmente una onda esférica y la reciben de forma independiente en cada uno de los cuatro cuadrantes en los que se divide el transductor (Fig. 1.29). Así, estas sondas no solo recogen la información obtenida por una sonda monohaz de su misma frecuencia, sino que aportan también una información angular relativa a la diferencia de fase de las ondas que llegan a cada uno de los cuadrantes, lo que aporta información complementaria a la anterior de la que se puede derivar, por ejemplo, la dirección de incidencia del frente de la onda acústica recibida.

Las sondas multihaz, por su parte, cuentan con transductores que emiten en una determinada frecuencia variando electrónicamente la dirección de recepción del haz. De este modo cubren un área muy amplia de forma análoga al SSS pero con una alta resolución (definida por la distancia entre los diferentes ángulos con que se varía el haz de recepción).

Costes y limitaciones

De entre los cuatro instrumentos que conforman un equipo acústico, el GPS y el ordenador son elementos no exclusivamente acústicos, habituales en grupos de investigación, equipos técnicos y usuarios no especializados, por lo que no representan una limitación técnica ni económica.

En cuanto a las ecosondas, las sondas monohaz fueron las primeras sondas científicas en aparecer en el mercado y, junto con los sónares de barrido lateral, son las opciones más accesibles para los usuarios, tanto por la relativa sencillez de su manejo y de la interpretación de los datos obtenidos, como por su coste (pueden adquirirse modelos sencillos por aproximadamente 15000 €). Aún así, el coste de estos equipos sigue siendo elevado, pero recientemente ha habido alguna iniciativa empresarial para la fabricación de modelos de bajo coste (Knudsen Engineering Ltd.²).

Las sondas de haz partido representan un salto cuantitativo importante con respecto a las anteriores, tanto en su precio de adquisición como en la dificultad de su manejo. Por último, las sondas multihaz son la opción más cara del mercado (en la actualidad los modelos más asequibles no tienen precios inferiores a 80000 €) y la que tiene más requisitos técnicos.

Junto a sus costes, otra de las limitaciones de las sondas científicas es su instalación. Pensadas para ser instaladas de forma permanente en un barco oceanográfico de tamaño medio, su portabilidad es reducida o complicada (incluso en los modelos portátiles). Este aspecto se complica considerablemente al tratarse de sondas de haz partido o sondas multihaz, con requerimientos técnicos mayores (calibración la primera y corrección del movimiento del barco y de las características de la columna de agua de la segunda) que dificultan aún más su portabilidad.

Por estas razones, un equipo que cumpliera estas premisas de sencillez y bajo coste consistiría en un transceptor portátil y asequible. Existen en el mercado soluciones de este tipo que, aunque requieren una instalación delicada en cada ocasión de uso, son suficientemente versátiles para trabajar con varias frecuencias y tipos de transductor, lo que los convierte en herramientas adecuadas para llevar a cabo diferentes estudios en la zona costera en general. Un ejemplo de estos transceptores es el EA400P de Simrad³, que será empleado en esta tesis.

²<http://www.knudsenengineering.com/>. Fecha de última consulta: 23 de Abril de 2012

³<http://www.simrad.com/>. Fecha de última consulta: 23 de Abril de 2012

Este transeceptor debería ser capaz de trabajar con un transductor de propósito general (y, por lo tanto, de bajo coste), ya sea monohaz (no especializado y de bajo coste) o de barrido lateral. Ejemplos de estos transductores son el Combi D 38/200 kHz y el SSS de 200 kHz de Simrad, que han formado parte del instrumental utilizado en este trabajo (capítulos 2, 4, 3). En la actualidad, todo este equipamiento tiene un coste aproximado de unos 15000 €.

Todavía lejos de estos costes se encuentran las sondas de haz partido (unos 55000 €). Diseñadas para la evaluación de *stocks* pesqueros, estas sondas han sido amplia y exitosamente utilizadas (Lyons, 1998; Stanley *et al.*, 2000; Djemali *et al.*, 2009), aunque en muy pocos casos en aplicaciones diferentes a la de evaluación pesquera. Sin embargo, las características de los datos que recogen (que completan los datos energéticos recogidos por las sondas monohaz con datos angulares) y su esperable descenso de costes (como ha sucedido en otros modelos anteriores), hacen de estos equipos opciones con gran potencial para la gestión costera en los próximos años. Por estas razones, una sonda de haz partido (concretamente una sonda EK60 con un transductor ES200-7C de Simrad) ha sido utilizada también en este trabajo para la búsqueda de nuevas aplicaciones (capítulo 5).

1.4. Software y métodos de análisis

La potencialidad de los métodos acústicos en los estudios de los fondos costeros y oceánicos se puso de manifiesto en los años 1980, con los primeros trabajos en los que se aplicaban estas técnicas (Nicholson, 1981; Orłowski, 1984), aunque se habían realizado incursiones metodológicas con anterioridad (Tyce, 1996).

A raíz de estos trabajos, Voulgaris y Collins (1990) comenzaron a comercializar el software **RoxAnn Seabed Classification System**. Este programa se basa en el análisis de dos variables (E_1 y E_2), calculadas a partir de la energía recibida en el primer y segundo eco (respectivamente), para realizar la discriminación de los tipos de fondos.

La variable E_1 se calcula como la integral de la energía en la cola del primer eco y representa una medida relativa de la rugosidad del fondo. La variable E_2 se calcula como la integral del segundo eco completo, y representa una medida relativa de la dureza del fondo (Fig. 1.30). Aunque el sistema RoxAnn no publica los detalles de los puntos de corte que definen el inicio y fin de la cola del eco, su simplicidad permite realizar aproximaciones al cálculo de estas variables independientemente del paquete comercial.

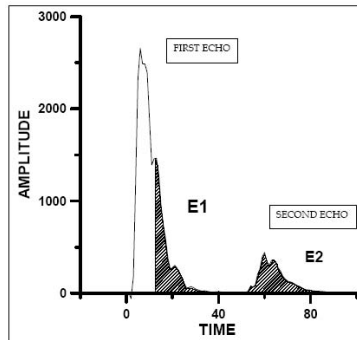


Figura 1.30: Áreas integradas en el primer y segundo eco para el cálculo de las variables E_1 y E_2 . Fuente: Hamilton (2001).

El análisis conjunto de las variables E_1 y E_2 , a través de la representación gráfica en un sistema de coordenadas $E_1 - E_2$ o del análisis de conglomerados, permite obtener una clasificación relativa de los tipos de fondos, donde cada punto estudiado se agrupa con aquellos a los que más se parece (atendiendo a su rugosidad y dureza).

Para convertir estos resultados en una cartografía bentónica, es necesario contar con datos de campo que permitan asignar un tipo de fondo a cada una de las clases obtenidas en el análisis anterior.

El sistema RoxAnn ha sido aplicado en multitud de estudios con éxito (Magorrian *et al.*, 1995; Caddell, 1998; De Grave *et al.*, 2000; Justy *et al.*, 2000; Reid y Maravelias, 2001; Lindenbaum *et al.*, 2008 entre otros muchos). Sin embargo también se han descrito en varias ocasiones sus limitaciones. Según Hamilton (2001), RoxAnn es un sistema útil en el cartografiado de fondos siempre que se busque una clasificación sencilla, de no más de cuatro o cinco clases, pero no es fiable para una clasificación más fina. Además se han observado errores debidos a la sensibilidad del sistema a la perpendicularidad del transductor (Greenstreet *et al.*, 1997), al estado del mar (Hamilton, 2001; Atallah *et al.*, 2002), a la velocidad de barco y a la pendiente del fondo (Voulgaris y Collins, 1990; Atallah *et al.*, 2002).

Como alternativa al sistema RoxAnn, en 1992 salió al mercado el sistema de clasificación de fondos de la compañía *Qeuster Tangent* (conocido como **QTC**). Este sistema obtiene la información del fondo oceánico únicamente a partir

del análisis del primer eco. A través de la aplicación de cinco algoritmos que no se detallan en la documentación del sistema (histograma de distribución de amplitudes, cuantiles de la distribución de amplitudes, integrales de las amplitudes en varios puntos del eco y ratios de estas integrales, coeficientes del espectro de Fourier y coeficientes de ondículas (wavelets)), se extraen 166 parámetros (Prager *et al.*, 1995) que somete a un análisis de componentes principales. De este modo se obtienen tres componentes (Q-values) con un significado matemático y físico desconocido para el usuario (Hamilton, 2001).

Igual que en el caso anterior, con el análisis *cluster* de estos componentes, se obtienen clasificaciones relativas del tipo de fondo, que deben ser comparadas con datos adquiridos *in situ*. Este sistema tiene también la opción de realizar una clasificación en tiempo real, siempre y cuando exista un catálogo de fondos de la zona de estudio que contenga todos aquellos que serán encontrados⁴. Por ejemplo, en una área arenosa con y sin fanerógamas, la construcción previa de un catálogo de las respuestas acústicas de ambos tipos de fondos permitirá una posterior clasificación no supervisada del área.

QTC ha sido utilizado con éxito en numerosos trabajos con objetivos variados: cartografía de fondos (Collins *et al.*, 1996; Galloway y Collins, 1998; Anderson *et al.*, 2002), cartografía de vegetación submarina (Riegl *et al.*, 2005; Quintino *et al.*, 2010), clasificación de fondos sedimentarios (Freitas *et al.*, 2008), etc.

A diferencia del sistema RoxAnn, QTC no está limitado a las sondas monohaz, y ha sido adaptado para trabajar con sondas multihaz, lo que lo convierte en el sistema con mayor capacidad de clasificación del mercado. Sin embargo sigue contando con limitaciones asociadas a la toma de datos como la pendiente del fondo (Szalay y McConnaughey, 2002). La velocidad del barco, en cambio, no aparece como un factor significativo en los resultados, al contrario de lo que sucedía con el RoxAnn (Hamilton, 2001). Esto se debe a que es el segundo eco (utilizado solo en el RoxAnn) el que se ve más afectado por esta variable.

Se han publicado algunos trabajos comparativos utilizando los sistemas QTC y RoxAnn para cartografiar las mismas áreas, aunque no siempre con los mismos equipos acústicos (en algunos casos se utilizó el RoxAnn con una sonda monohaz y el QTC con una multibeam (Serpetti *et al.*, 2011)). En la mayoría de estos trabajos se obtienen mejores resultados con el software QTC (Hamilton, 2001; Serpetti *et al.*, 2011), aunque se han publicado también trabajos donde se han obtenido resultados ligeramente mejores con el software RoxAnn (Foster-Smith *et al.*, 2004).

⁴<http://hydrochart.dk/qtc.html#qtcview>. Fecha de última consulta: 23 de Abril de 2012

Junto a estos dos softwares, los más utilizados en los trabajos científicos, existen otros que aparecieron posteriormente y han tenido menor divulgación. Todos ellos se encuentran bajo licencias basadas en copyright que impiden modificaciones realizadas por los usuarios así como la apertura de los métodos, algoritmos y código.

Entre estos software cabe destacar los siguientes:

- **BioSonics VBT-Seabed Classification** (Burczynski, 1999), adaptado para sondas acústicas de la misma marca comercial (Hoffman *et al.*, 2002; Dommissé *et al.*, 2005; Foster *et al.*, 2009; Foster *et al.*, 2011) y criticado por no ser robusto ante cambios de profundidad en la zona de estudio (Dommissé y Urban., 2001; Hamilton, 2001).
- **CSIRO multifrequency system** (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), desarrollado para la estimación de biomasa y la clasificación de fondos (Siwabessy *et al.*, 1999; Kloser *et al.*, 2001), adaptado a sondas Simrad multifrecuencia (12, 38 y 120 kHz).
- **ECHOplus**, una versión digital de RoxAnn (SEA, Advanced Products Ltd.), que aprovecha los datos multifrecuencia y proporciona buenos resultados, incluso comparado con QTC (Bates y Whitehead, 2001; Riegl *et al.*, 2005).
- **ABC**, que procesa los archivos del Echo Listener (de Echoview) y que presta especial interés a la corrección de profundidad de la señal (Clarke y Hamilton, 1999).
- **Sonar Pro**, un software desarrollado por Helge Balk (Departamento de Física de la Universidad de Oslo), en colaboración con numerosos grupos de investigación, cuyos cambios y sugerencias se incorporan en las sucesivas versiones. Este programa ha abordado recientemente la problemática de la clasificación de fondos.

A pesar de los resultados obtenidos con su uso, la mayoría de estos programas comparten dos importantes limitaciones. Su coste (junto con el de los equipos acústicos) los sitúa fuera del alcance de una amplia comunidad de usuarios potenciales, que dentro del campo de su actividad tienen la necesidad de conocer los fondos costeros. Por otro lado, las compañías que los comercializan dan poca información sobre los procesos que tienen lugar dentro de los “paquetes de

clasificación”, para proteger las patentes (Clarke y Hamilton, 1999), por lo que estos son desconocidos para el usuario, en mayor o menor medida dependiendo del programa. Se convierten en cajas negras (“*black box*”).

El no poder conocer con detalle los algoritmos utilizados para las clasificaciones de fondos imposibilita la revisión crítica fundamental en un trabajo científico, obligando a los autores de los mismos a describir los resultados sin poder valorar su relación con la metodología utilizada para llegar a ellos. De este modo, por ejemplo, no pueden explicarse las diferencias observadas en clasificaciones obtenidas utilizando programas diferentes (Hamilton, 2001). Esta falta de ejercicio crítico, y la imposibilidad de modificar los algoritmos utilizados, dificultan enormemente la mejora de estos, limitando el avance de estas tecnologías y la aparición de nuevas aplicaciones.

En las técnicas acústicas para la cartografía de fondos marinos los factores limitantes son el coste del equipo acústico y del software de clasificación. Dado el aumento del interés de la comunidad científica, técnica y de gestores por estas herramientas, algunas casas comerciales responsables del diseño de ecosondas y transductores han comenzado a trabajar en modelos de baja gama, simplificados y asequibles (ver sección 1.3), por lo que si estas iniciativas siguen su curso, pronto la adquisición del equipo dejará de ser una limitación.

En cuanto al software, la existencia de programas libres (gratuitos, de código abierto, y con permiso para modificarlo, *Software Libre*, SL) representaría la desaparición de las limitaciones citadas anteriormente. Por ser distribuidos gratuitamente por Internet, podría acceder a ellos cualquier usuario interesado y, por ser de código abierto y libre (y por lo tanto consultables y modificables), permitirían al usuario conocer la totalidad de los procesos involucrados en el tratamiento de los datos acústicos, así como añadir modificaciones de cara a su mejora. Aunque todavía son muy escasas las iniciativas para generar este tipo de programas en el campo del tratamiento de la señal acústica del fondo, ya existen algunas iniciativas como la de la Universidad de Columbia que ha desarrollado el OSS **MB-System** para la generación de batimetrías con sondas multihaz⁵.

Otra de estas iniciativas es la del programa **Ecosons** (desarrollado por el Grupo de Recursos Marinos y Pesquerías de la Universidad de A Coruña con la colaboración del Laboratorio de Medida Avanzada por Imagen de la UNED).

⁵<http://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/MB-System/>. Fecha de última consulta: 23 de Abril de 2012

Ecosons es un programa modular que tiene por objetivo el análisis de datos acústicos para el estudio de diferentes características de los fondos costeros. Aunque comenzó siendo un programa para el análisis de datos adquiridos con sondas monohaz, ha ido ampliándose (añadiendo módulos) paralelamente al desarrollo de nuevas aplicaciones (presentadas en este trabajo) y actualmente analiza datos de sonar de barrido lateral y de sondas de haz partido. Este software se encuentra disponible para todos los usuarios junto con su código extensamente comentado⁶, para facilitar su conocimiento y mejora.

Esta reducción de costes podría aumentar drásticamente el uso y el desarrollo de nuevas aplicaciones de las tecnologías acústicas. Algo similar ha sucedido ya con las técnicas de teledetección óptica, donde la adquisición de las imágenes representa el mayor coste y, por lo tanto, el principal factor limitante para su uso. La experiencia previa con teledetección óptica parece apuntar en esa dirección.

El primer sensor hiperespectral (*Airbone Imaging Spectrometer*, AIS) se puso en funcionamiento en el año 1983. Desde entonces hasta finales de esa década, nuevos sensores hiperespectrales salieron al mercado (Goetz, 2009) (*Fluorescence Line Imager*-FLI, *Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer*-AVIRIS, *Compact Airborne Spectrographic Imager*-CASI, etc.). En el año 2002, 19 años después de la aparición del primer sensor, el número de sensores hiperespectrales que habían estado disponibles para los usuarios era de 39, y las imágenes adquiridas por ellos habían dado lugar a 3740 publicaciones científicas (Scholar de Google⁷, búsqueda: “hyperspectral sensor image”). Durante los 9 años siguientes (entre 2003-2012) el número de sensores aumentó ligeramente, sin embargo las publicaciones científicas se multiplicaron por cuatro (Scholar de Google⁷, búsqueda: “hyperspectral sensor image”)⁸. Esta aceleración en la producción de conocimiento tiene posiblemente relación con la distribución gratuita de las imágenes de los sensores hiperespectrales Hyperion y CHRIS/Proba, que comenzó en el año 2002, facilitando el acceso a imágenes hiperespectrales a muchos usuarios que no contaban con los fondos necesarios para su adquisición que no hubiesen, de otro modo, destinado fondos a la adquisición de imágenes para investigar nuevos algoritmos y usos de estos sensores.

⁶<http://www.recursosmarinos.net>. Fecha de última actualización: 23 de Abril de 2012

⁷<http://scholar.google.es/>. Fecha de última consulta: 23 de Abril de 2012

⁸Los sensores hiperespectrales tenidos en cuenta en este trabajo son aquellos que han sido referenciados en trabajos o webs de revisión (Goetz, 2009, Schaepman *et al.*, 2007, Grace *et al.*, 2007). Es posible que no se hayan tenido en cuenta sensores de aplicación militar o con usos muy minoritarios, por lo que estos valores deben tomarse con cautela.

Para los mismos periodos, una revisión preliminar de la bibliografía publicada sobre estudios acústicos de fondos bentónicos (Scholar de Google⁷, búsqueda “echosounder seabed”), muestra unos valores de 2090 y 3950 artículos respectivamente. Esto representa un aumento de algo menos del 100% (compárese con el aumento del 300% en el caso anterior de los sensores hiperespectrales), probablemente atribuible al aumento de las publicaciones científicas que experimentan todas las disciplinas. Cabe esperar, por lo tanto, que la disponibilidad de equipamiento acústico asequible y el desarrollo de SL para el tratamiento de los datos recogidos con él, genere una aceleración similar en el número de publicaciones y la aparición de nuevas aplicaciones.

OBJETIVOS

El **objetivo general** de esta tesis es **explorar potenciales aplicaciones de las técnicas acústicas al estudio de la zona sumergida costera. La utilización de estas técnicas puede permitir obtener información de calidad, de gran utilidad para la caracterización del área de estudio, y hacerlo con herramientas sencillas y de bajo coste.**

A la premisa de bajo coste se une la de la simplicidad, y ambas son fundamentales para poner la información obtenida con estas aplicaciones al alcance de usuarios potenciales con presupuestos limitados y sin formación específica. Con esta finalidad en este trabajo se utiliza equipamiento acústico portátil y versátil (eliminando limitaciones asociadas a la necesidad de una embarcación de características específicas) y se ha desarrollado, para cada aplicación, software libre (de código abierto y gratuito) que permita el acceso, la popularización (y, con ella, la mejora) de las metodologías definidas en el presente trabajo.

Una de las primeras necesidades para llevar a cabo un estudio costero es conocer la topografía del área de estudio, que define y es consecuencia de procesos de dinámica litoral, aportes terrestres, etc. Esta información está habitualmente accesible para la zona emergida, pero en la zona sumergida es casi inexistente, de escasa resolución y/o poco actualizada. Por esta razón, el

PRIMER OBJETIVO acometido en este trabajo ha sido el de **poner a punto una metodología rigurosa y de fácil implementación (tanto desde el punto de vista del software como del instrumental empleado), que proporcione información topográfica del área sumergida (batimetría) de calidad, realizando un análisis crítico de las limitaciones de los resultados que la propia metodología proporciona (capítulo 2).**

En muchos estudios es necesario ir más allá y caracterizar, junto con la topografía de un área de estudio, la distribución de los diferentes tipos de hábitats bentónicos que se encuentran en dicha área. Los métodos acústicos han sido la respuesta a esta necesidad desde hace décadas, sin embargo sus costes han sido siempre elevados, ligados a equipos caros y software comercial. Para obtener una alternativa a estos métodos, en este trabajo se abordó como

SEGUNDO OBJETIVO, el **desarrollo de una metodología de cartografiado de hábitats en zonas someras (profundidades menores**

de 50 m) basada en el análisis de variables derivadas de la intensidad de la señal acústica reflejada por el fondo marino (capítulo 3).

Centrándonos en las necesidades crecientes de gestión de la zona costera, el establecimiento de planes de manejo eficientes depende en gran medida de la disponibilidad de información de calidad y actualizada, específica del recurso o ecosistema a gestionar. Un ejemplo es el de las praderas de fanerógamas marinas, concretamente de *Posidonia oceanica*. En retroceso desde hace años, estos ecosistemas son objeto de numerosos estudios y planes de gestión debido a su alta importancia ecológica. Sin embargo, los sistemas de cartografiado existentes son todavía insuficientes, si atendemos a sus costes y limitaciones. En este sentido, el

TERCER OBJETIVO de este trabajo ha sido el **desarrollo de una metodología de cartografiado de praderas de fanerógamas marinas, basada en la distribución de las alturas de sus hojas, detectadas a partir del análisis de datos acústicos adquiridos con un montaje modificado de un sonar de barrido lateral (capítulo 4).**

Por último, cuando el objetivo de la gestión son especies que viven dentro del sedimento, los métodos disponibles en la actualidad son solo aquellos basados en la observación o muestreo directos (buceos, dragas, etc), con un altísimo coste de tiempo y una baja resolución espacial que los hacen ineficaces para una cartografía periódica. Buscando dar respuesta a esta necesidad se definió el

CUARTO OBJETIVO de este trabajo como el **desarrollo de una metodología de mapeado de bivalvos solénidos endobentónicos basada en la respuesta acústica del fondo, analizando concretamente la información angular adquirida con una sonda de haz partido (capítulo 5).**

APLICACIONES ACÚSTICAS



Desarrollo y evaluación de un método de generación de batimetrías de zonas costeras, rápido y de bajo coste, usando sondas monohaz

Este trabajo surgió de la necesidad de generar batimetrías de calidad para la zona costera, en el marco de proyectos de colaboración con asociaciones de pescadores, en los que no se podía contar con herramientas de alto coste (sondas multihaz).

Su principal contribución consiste en la mejora introducida por la integración de la información batimétrica con la información geográfica (obtenida a partir de fotointerpretación y toma de datos en el campo con dispositivos GPS) y la metodología de corrección iterativa de la batimetría obtenida.

Este trabajo se desarrolló en colaboración con dos miembros del grupo de investigación de Recursos Marinos y Pesquerías: Sara Aceña y Elena Couñago.

Ha sido enviado para su publicación a la revista *Estuarine Coastal and Shelf Science*, con el título "Development and assessment of a fast, low-cost method for VBES bathymetry generation in coastal areas".

2.1. Introducción

Las zonas costeras han sido objeto de numerosos estudios en las últimas décadas debido a su actividad económica, a su importancia ecológica y social (Costanza y Farley, 2007; Newton y Icely, 2008) y a su vulnerabilidad a la presión humana. Todas estas razones hacen esencial la aplicación de técnicas de gestión sostenible para el futuro de los recursos naturales de estas áreas y, en consecuencia, la preservación de sus ecosistemas y las oportunidades para el desarrollo económico de las comunidades costeras (Clark, 1996). Dado que no existe un consenso en la definición de la zona costera (Martínez *et al.*, 2007), en este trabajo consideraremos la zona costera como la zona marítima entre 0 y 100 m de profundidad (Burke *et al.*, 2001), de acuerdo con las características del estudio. Por su proximidad al área terrestre, y la influencia de esta, en esta zona las escalas temporal y espacial de los estudios deben estar a medio camino entre las escalas terrestres y marinas.

En la zona terrestre de ésta área costera está disponible gran cantidad de información de calidad (modelos digitales de elevación, datos topográficos, etc.). Sin embargo, la disponibilidad y la calidad de la información geográfica para las áreas marinas es todavía muy pobre debido a las dificultades y al coste de adquisición de los datos (Pickrill y Todd, 2003).

La información batimétrica constituye un elemento clave cuando se trabaja en las zonas costeras (Gao, 2009), tanto si el estudio se centra en temas como la geomorfología, la hidrología y los procesos sedimentarios (Klemas, 2009), la pesca, los efectos de las tormentas y maremotos/*tsunamis*, la exploración de minerales (Basu y Malhotra, 2002) o la ecología (Stocks *et al.*, 2004; Wedding *et al.*, 2008) como para el desarrollo de modelos hidrodinámicos (por ejemplo, Irish y White, 1998; Sutherland *et al.*, 2004; van Rijn *et al.*, 2003), sólo por mencionar algunos. Para satisfacer la necesidad de batimetrías precisas y rápidas los sistemas de medición de la profundidad han evolucionado durante el último siglo, del uso de una cuerda con un plomo, a las ecosondas monohaz, multihaz y sidescan sonars (SSS), LiDAR (*Light Detection And Ranging*), sistemas de láser *line-scan* (Basu y Malhotra, 2002) o tecnologías de imagen por satélite (Lee *et al.*, 2010). La Tabla 2.2 resume las principales técnicas batimétricas actualmente en uso; cada una de ellas muestra su propio alcance máximo

de detección, su sensibilidad vertical y precisión, sus puntos fuertes, sus las limitaciones técnicas y económicas y las condiciones de uso más adecuadas.

Método	Sistema	Profundidad	Precisión	Factores limitantes	Potencialidades	Limitaciones	Mejor uso
Tecnología láser	LiDAR	Hasta 70 m	Hasta 15 cm	Claridad del agua, tipo de fondo, estado de la superficie	Rango amplio de profundidades; no son imprescindibles medidas simultáneas	Caro y con anchura de SWATH limitada	Distintos entornos con estrecha extensión (p.ej. decenas de kilómetros)
Imágenes	Microondas (satelital)	Aguas someras a profundas	Baja	Fallos de resolución de la imagen, frentes y condiciones climáticas (p.ej. olas)	Grandes áreas. No afectada por la cubierta de nubes	No muy precisa	Aguas oceánicas abiertas
Imagen	Óptica-analítica	Hasta 30 m	Alta	Calidad del agua, condiciones atmosféricas	Basada en procesos físicos. Precisa	Compleja ya que se requieren varios parámetros. Es esencial la verificación sobre el terreno	Aguas continentales turbias y someras, estuarios y canales fluviales

*CAPÍTULO 2. MÉTODO RÁPIDO Y DE BAJO COSTE PARA
BATIMETRÍA CON SONDA MONOHAZ*

Método	Sistema	Profundidad	Precisión	Factores limitantes	Potencialidades	Limitaciones	Mejor uso
Imagen	Óptica-empírica	Hasta 30 m	Variable	Calibración atmosférica, turbidez del agua, reflectancia del fondo	De fácil implementación. Precisa a ciertas profundidades	Profundidad limitada. Menor precisión a gran profundidad. Imprescindible la verificación sobre el terreno	Aguas costeras y cercanas a la orilla. Aguas abiertas
Imagen	Vídeo	Altura mareal	Alta	Fallos de resolución de la imagen, frentes y condiciones climáticas (p.ej. olas)	Puede revelar cambios batimétricos menores	Área limitada. Batimetría a lo largo de perfiles	Zona intermareal y estuarios
Acústica	Monohaz	> 1 km	Variable	Estado del mar y viento	Amplio rango de profundidades. Bajo coste. Sencilla implementación	Limitaciones derivadas de los parámetros acústicos	Todas las zonas excepto las muy someras
Acústica	Sonar de barrido lateral batimétrico	> 1 km	Alta	Estado del mar y viento	Alta precisión. Información de la estructura del fondo	Profundidades limitadas	Aguas someras

Método	Sistema	Profundidad	Precisión	Factores limitantes	Potencialidades	Limitaciones	Mejor uso
Acústica	Multihaz	> 1 km	Hasta 1 cm	Estado del mar y viento	Amplio rango de profundidades. Alta precisión	Dispositivo y software caros	Todas las zonas excepto las muy someras

Tabla 2.2: Técnicas batimétricas (adaptada de Gao, 2009) incluyendo tecnologías acústicas.

Los avances en teledetección óptica en las últimas décadas y las iniciativas para reducir su coste de adquisición para la investigación, han ampliado su uso como una tecnología batimétrica muy eficiente. Sin embargo, la alta atenuación del espectro electromagnético en el agua (especialmente en condiciones de mucha turbidez) restringe su uso a las aguas claras y muy poco profundas (alrededor del 10% de error, en condiciones de transparencia (McIntyre *et al.*, 2006)). La nueva tecnología LiDAR, basada en la señal de láser, tiene la capacidad de realizar estudios rápidos, tanto en áreas grandes como pequeñas, donde el estudio directo sería difícil, peligroso o imposible usando técnicas que usen la transmisión en el agua (Guenther *et al.*, 2000), obteniendo una batimetría de gran precisión. A pesar de sus excelentes resultados, su coste extremadamente alto la aleja de muchos usuarios potenciales. Además, la turbidez del agua plantea una limitación importante para el uso de este y otros métodos ópticos (más de 50m en condiciones de buena transparencia pero menos de 10 m en aguas turbias cercanas a la costa).

Para trabajar a mayores profundidades y con condiciones de turbidez más variables deben usarse métodos acústicos. El método acústico más sencillo es la sonda monohaz, que mide el camino recorrido por la onda acústica hasta el fondo. Los SSS también se utilizan para cartografiar los fondos y ganan cada día más popularidad; sin embargo, la batimetría derivada de estos no es exacta, debido al ángulo de inclinación necesario para maximizar la interpretación de las texturas del fondo (Zhu *et al.*, 2002), principal aplicación de los SSS. Las ecosondas multihaz proporcionan una buena batimetría así como información sobre la textura del fondo, por lo que se han convertido en el estándar de calidad para la caracterización del fondo marino y las batimetrías (International Hydrographic Organization, 2011; Lamarche *et al.*, 2011). Por otro lado, su creciente popularidad entre las instituciones y grupos de investigación ha lleva-

do al desarrollo de los algoritmos necesarios para la generación de batimetrías, así como de algunos software libres para implementar estos métodos (Caress y Chayes, 2011). Sin embargo, hoy en día las ecosondas multihaz siguen siendo equipos de elevados costes para los que además se aconseja una instalación a bordo de buques de gran tamaño.

En comparación con estas técnicas muy precisas pero costosas (multihaz o LiDAR) y que necesitan técnicos especializados, las ecosondas monohaz son consideradas por la International Hydrographic Organization (2011) como una solución de compromiso entre la precisión y el coste.

Después de su adquisición, los datos de las sondas monohaz deben ser procesados (filtrados e interpolados) con el fin de obtener una superficie batimétrica para la generación de un mapa, que constituye un instrumento efectivo para la gestión (Tortell, 1992) debido a su formato amigable.

Para obtener una superficie continua (con valores en las áreas no muestreadas) a partir de los datos de transectos es necesario realizar una interpolación (Doucette y Beard, 2000). Los métodos de interpolación implementados en los softwares SIG se utilizan comúnmente para interpolar estos datos pero que sus resultados son propensos a presentar artefactos a lo largo de los transectos. Existen otros algoritmos de batimetría *ad hoc* que se describen en la bibliografía, que interpolan los datos de una forma robusta, detectando datos atípicos y realizando adaptaciones locales (Canepa *et al.*, 2003). Sin embargo, estos algoritmos no son fácilmente accesibles para los usuarios, ni están integrados en los paquetes de software SIG. El último paso para obtener la batimetría final es siempre manual y supervisado. La importancia de este paso depende de lo logrado en los anteriores (Calder, 2006).

Por último, debe evaluarse la calidad de los resultados obtenidos (International Hydrographic Organization (2011)). La precisión de la interpolación obtenida depende de los métodos elegidos de interpolación (Schmidt y Persson, 2003) y del software de implementación del algoritmo. Habitualmente se utilizan procesos de validación cruzada (que calculan fácilmente los paquetes geoestadísticos), pero no son válidas aquí, ya que asumen una distribución uniforme de los puntos de muestreo (a no ser que se indique lo contrario, sólo evaluarán la calidad de los resultados dentro de los transectos). No tener en cuenta esta limitación provocará la estimación de valores excesivamente pequeños de los errores de la batimetría generada.

El objetivo de este trabajo es proponer y evaluar una metodología sencilla para la obtención y post-procesamiento de datos obtenidos con sondas monohaz, con

el fin de obtener una batimetría detallada de las zonas costeras con un coste muy reducido (utilizando una sonda monohaz y software libre). Se presentarán soluciones para tres problemas principales de las actuales metodologías que utilizan sondas monohaz: una simulación de Monte-Carlo para tener en cuenta el error asociado a los dispositivos GPS, una corrección manual de las líneas batimétricas para incluir conocimiento previo del área de estudio y un diseño de validación cruzada que utiliza transectos no incluidos en la interpolación.

2.2. Metodología

A continuación se describe brevemente el método propuesto para la generación de batimetría, no sólo las partes específicas de nuestro trabajo (detección y filtrado del fondo, ponderación del error mediante simulación de Monte-Carlo, y estimación de los errores, que se tratan con mayor detalle), sino todos los pasos seguidos para obtener los resultados presentados.

Campana acústica

La campaña acústica fue diseñada de acuerdo con las siguientes reglas:

Los transectos acústicos deben diseñarse perpendiculares a la línea de costa Dado que las líneas batimétricas generalmente transcurren paralelas a la costa, los transectos acústicos en la misma dirección registrarán pocas variaciones de profundidad. Con transectos perpendiculares recogemos la información en la dirección en la que esperamos la mayor variabilidad, y por medio de interpolación se reconstruye en la dirección en la que se espera la menor variabilidad. Los algoritmos de interpolación son más eficientes cuanto menor es el cambio en la pendiente en el área considerada.

La separación horizontal entre transectos debe ser seleccionada de acuerdo con la precisión horizontal deseada. Las características de la zona de trabajo (tales como la variabilidad del tipo de hábitat bentónico o la morfología del fondo) deben tenerse en cuenta a la hora de decidir el número de transectos necesarios para obtener una superficie batimétrica precisa.

Transectos acústicos extra que se incluyen para evaluar la calidad de la batimetría final a través de comparación directa. Estos transectos se encuentran en las zonas donde se cree que existe suficiente densidad de datos para obtener una interpolación de buena calidad. A diferencia de lo realizado por Merwade (2009) u otras metodologías de validación hidrográfica, se utilizarán los transectos completos, y no una selección aleatoria de puntos de los mismos. Debe llegarse a un compromiso entre que estos transectos sean estadísticamente representativos (es decir, que contengan algunos de los tipos de irregularidades presentes en el área de estudio) y que no se eliminen de la interpolación datos importantes. Por esto, solo se escogieron transectos con un número alto de cruces con otros o que transcurran cerca de otros realizados en diferente día.

Equipamiento acústico. Toda la metodología se orienta a utilizar una ecosonda vertical portátil (VBES) con capacidad para grabar el ecograma y exportar los archivos (con un formato abierto o bien documentado, como el formato RAW de las ecosondas científicas Simrad). Estas ecosondas son asequibles y fáciles de usar y permiten utilizar software de código abierto para el post-procesamiento de los datos adquiridos.

Procesamiento de los datos acústicos

Los datos acústicos, almacenados en los archivos RAW por el software de la ecosonda, fueron importados desde el software ECOSONS (un software de código abierto desarrollado para procesar los datos adquiridos con cualquier ecosonda¹; Sánchez-Carnero *et al.*, 2007)² y se procesaron con él con el fin de calcular la profundidad del fondo y corregir los movimientos cabeceo y balanceo de la embarcación, el error asociado a los datos de GPS y las variaciones de marea.

En este trabajo, se utilizó un algoritmo simple de detección del fondo que localiza el máximo de los valores de intensidad recibida y busca el primer valor menor que un primer umbral. Este umbral se define en un número de decibelios (definidos por el usuario) por debajo del máximo de energía. Para asegurar que se detecta el primer rebote del fondo, se define un segundo umbral, a una intensidad acústica por debajo del anterior (también definido por el usuario

¹Actualmente solo trabaja con archivos RAW de Simrad.

²Este programa puede descargarse en <http://www.recursosmarinos.net/download/bathymetry>

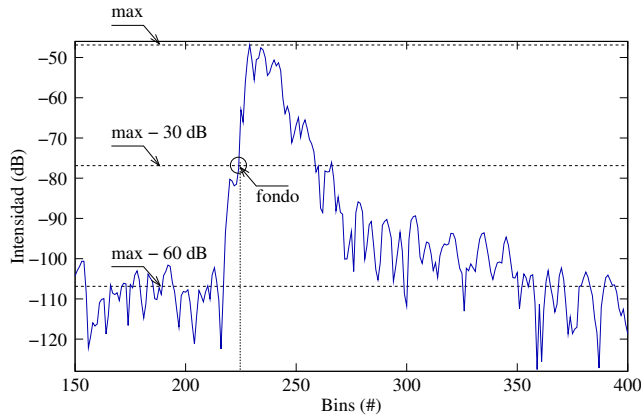


Figura 2.1: Ilustración de l el algoritmo de detección de fondo basado en el uso de dos umbrales.

como un número de decibelios por debajo del máximo). Se localizará el fondo en aquel *bin* que, situado antes del máximo (hacia la superficie), tenga un valor de energía menor al primer umbral, siempre que antes de el se encuentre un *bin* con valor de intensidad igual al segundo umbral (Fig. 2.1). Como una regla derivada de observaciones anteriores de los ecogramas, se utilizó un valor de 30 dB (por debajo del máximo valor del *ping*) para el primer umbral y un valor de 60 dB para el segundo (sobre todo para corregir señales muy ruidosas).

Después de esta primera localización del fondo, se aplicó un algoritmo de suavizado que elimina las posiciones del fondo demasiado alejadas de la profundidad media de los *pings* vecinos sustituyéndolas por la interpolación lineal de estos. Este paso está destinado principalmente a rellenar aquellos *pings* que no tienen datos de eco (*lost pings*).

Cuando se conoce el momento de adquisición de los pings acústicos (t_i), se puede corregir el efecto de la marea en los datos de profundidad de la batimetría mediante la sustracción de la altura de marea $h(t_i)$ en el momento de adquisición:

$$\bar{H}_i = H_i - h(t_i) \quad (2.1)$$

Con el fin de hacer predicciones precisas de la altura de la marea en un lugar determinado, tenemos que encontrar los coeficientes de Fourier del ciclo de las

mareas para ese lugar en concreto (o uno cercano). Estos coeficientes de Fourier se mantienen prácticamente constantes en el tiempo aunque algunos de ellos necesitan puestas al día cada década ((Pugh, 1987)). Sin embargo, para obtener una predicción de la altura de la marea a corto plazo suficientemente buena, se puede aplicar una sencilla interpolación trigonométrica (solo considerando el primer término armónico) partiendo de dos alturas (h_1 y h_2) de marea baja y alta y los correspondientes momentos (t_1 y t_2):

$$h(t) = h_1 + (h_1 - h_2) \cos\left(\pi \frac{t - t_1}{t_2 - t_1}\right) \quad (2.2)$$

Realizada la corrección de marea, los pings se filtraron una vez más con el fin de corregir el movimiento de balanceo y cabeceo del barco, que provoca una variación de la profundidad casi periódica en el tiempo (en torno a ± 30 cm de amplitud a profundidades alrededor de los 17 m) debido a la separación del haz acústico de la vertical. El método utilizado fue un filtro de mínimos aplicado en ventanas que comprenden los *pings* en un radio de 10 m alrededor de una determinada medida de profundidad. La profundidad mínima retenida correspondería a una orientación casi vertical del haz del transductor. Por tanto, sólo un *ping* cada 10 m se mantuvo en cada transecto. Las coordenadas geográficas para este valor de profundidad se han calculado como el valor medio de los *pings* de la ventana utilizada. Este último paso reduce el número de puntos para procesar, sin perder información relevante.

Aunque se han sustituido los datos batimétricos perdidos y se ha corregido el error sistemático introducido por el movimiento del barco todavía existen dos fuentes de error sistemáticas: la precisión de la batimetría (usualmente alrededor de 5 cm para transductores de 200 kHz) y el error de posicionamiento del GPS (alrededor de 5 m). Cerca de la costa, con una pendiente típica del 10 %, este último error horizontal incorporará un error vertical de 0,5 m (r.m.s.). Estos errores de posición se han abordado en trabajos previos para evaluar la incertidumbre de la batimetría usando simulaciones de Monte Carlo, es decir, simulando errores aleatorios en el sistema de posicionamiento y, a través de la propagación de errores o del recálculo de la batimetría, valorar los errores estándar en la batimetría interpolada Jakobsson *et al.* (2002).

Suponemos que la batimetría a lo largo de los transectos tiene una precisión máxima allí donde los datos se distribuyen siguiendo la orientación de la pendiente (ver el diseño del estudio acústico más arriba). Por lo tanto, la desviación típica en el plano horizontal, puede tomarse como

$$\sigma_{xy} = \delta r \times |\sin \Delta\theta| \quad (2.3)$$

donde $\delta r = 5$ m es un error estándar de GPS, y $\Delta\theta$ es el ángulo formado entre la trayectoria del transecto en ese punto y la orientación de la pendiente de la batimetría. De un modo similar, la desviación típica de la profundidad puede ser estimada como

$$\sigma_z = \delta r \times |\sin \Delta\theta| \times |\nabla \bar{H}| \quad (2.4)$$

donde $|\nabla \bar{H}|$ denota la pendiente de la superficie batimétrica en ese punto. Para calcular estos errores debe generarse una superficie batimétrica aproximada previamente (ver subsección de información SIG a continuación).

En este trabajo, se utiliza el método de Monte Carlo para mejorar la batimetría, simulando medidas batimétricas alrededor de los puntos para forzar una ponderación relativa en el algoritmo de interpolación (los algoritmos de interpolación implementados en software SIG no permiten actualmente incluir esta información). Se asume que los puntos simulados tienen una distribución gaussiana alrededor de los puntos promediados. La varianza local introducida por esta simulación se sumará a la varianza original de los datos, por lo que no es inconsistente que aparezcan varianzas nulas en la simulación de Monte Carlo allí donde los transectos son perpendiculares a las líneas batimétricas: la varianza de las medidas reales será la única presente en esos puntos.

Sistemas de Información Geográfica

Una vez que los datos acústicos se han procesado, los archivos resultantes con las localizaciones GPS y los valores de profundidad son importados desde el software SIG que será utilizado para generar la batimetría mediante interpolación y corrección interactiva. En este trabajo se han comparado dos software SIG: el software libre gvSIG y el software comercial ArcGis.

Interpolación de los datos para generar una superficie batimétrica:

El algoritmo de interpolación más adecuado dependerá de la validez del modelo adoptado para la distribución de los datos del muestreo y del área de

estudio, así como de la implementación del algoritmo en el software y los parámetros personalizables (en su mayoría referidos a las hipótesis estadísticas subyacentes).

Los mejores métodos para la interpolación de modelos de elevación digital son, según la bibliografía, la ponderación de distancia inversa (IDW), la base radial de funciones (RBF), el *kriging* ordinario (KO) y el *kriging* universal (KU) (Chaplot *et al.*, 2006;Erdogan, 2009). Basándonos en pruebas anteriores, en este trabajo vamos a utilizar el metodo que proporciona mejores resultados en cada uno de los SIG para comparar sus resultados: RBF de ArcGIS, y el UK de gvSIG.

Los parámetros de interpolación se seleccionarán en función de dos criterios: un criterio geoestadístico y un criterio de muestreo. El criterio geoestadístico utilizará el semivariograma empírico para seleccionar los parámetros correctos del modelo. El criterio de muestreo atiende a dos particularidades del muestreo por transectos: el recubrimiento completo del área de estudio, es decir, el radio de la interpolación de búsqueda mínimo requerido para obtener una superficie batimétrica sin agujeros, y la inclusión de datos de varios transectos en la interpolación de cada punto, necesario para obtener una buena evaluación de la pendiente transversal en las proximidades de un transecto. Por esto, se utilizó la opción de ArcGIS de establecer un número mínimo de puntos por cuadrante. En gvSIG, donde esta opción no esta disponible, el número mínimo de puntos utilizados para la interpolación tuvo que ser incrementado (teniendo en cuenta, por ejemplo, el número diez veces mayor de puntos después de la simulación de Monte Carlo, que requiere 10 veces más puntos mínimos para la interpolación).

Complementación de los datos batimétricos con información geográfica (edición manual): Los sistemas SIG permiten un paso final flexible consistente en la corrección manual de la batimetría. Existen dos efectos importantes que requieren corrección: accidentes geográficos no resueltos por los transectos de muestreo, tales como la ubicación exacta de las costas o zonas emergidas o poco profundas, y las inconsistencias en los datos, por ejemplo, las diferencias de profundidad entre los transectos que se cruzan (causada por errores en el procesamiento de los datos acústicos) o las discontinuidades introducidas por el algoritmo de interpolación (radio finito de búsqueda y otros efectos como se ha descrito en Meyer, 2004).

Para evitar la primera fuente de error, los accidentes geográficos, completaremos la información acústica con cartografía vectorial: línea de costa en marea

baja y pequeñas islas y bajos visibles en las ortofotografías (a las que se les da un valor de 0 m). La línea de costa detallada que se ha utilizado fue fotointerpretada a partir de ortofotos de 0,5 m de tamaño de píxel (Casal *et al.*, 2010)³. Esta información no fue utilizada en las playas, donde las variaciones observadas entre años fueron grandes, por lo que se prefirió dejar el límite sin definir (extrapolar). Para reducir las discontinuidades en la superficie introducidas por el algoritmo de interpolación *ciego*, se realizó un proceso de depuración manual.

Después de la interpolación inicial, las líneas batimétricas se generan con un SIG para un número de profundidades dadas. Se extrajeron y corrigieron las líneas correspondientes a cada metro de profundidad cerca de la costa y más separadas conforme se separan de ella (separación de 5 m hasta los 50 m de profundidad). Estas líneas fueron corregidas manualmente con el fin de hacerlas coherentes con la información fiable de las ortofotografías y de los datos acústicos. Las correcciones se aplican de acuerdo a algunas reglas sencillas que hacen la corrección menos dependiente del usuario. Sin embargo, estas reglas requieren interpretación, por lo que es difícil incluir el proceso en un software:

1. Las líneas batimétricas se modifican cuando su trazado no es coherente con los valores acústicos utilizados en la interpolación. Por ejemplo, en zonas próximas a la orilla, pueden encontrarse valores acústicos por debajo de los -5 m en zonas con líneas batimétricas de profundidades más someras que -5 m.
2. Se eliminan las líneas batimétricas cerradas que no contengan ningún valor acústico.
3. Se corrigen los lugares en los que dos líneas batimétricas (correspondientes a dos valores de profundidad diferentes) se cruzan.
4. Se eliminan las líneas batimétricas generadas como resultado de la extrapolación fuera de la zona de estudio.
5. Se suavizan los ángulos rectos que en ocasiones dibujan las líneas batimétricas (que perfilan la intersección de dos transectos), forzándolas a seguir la forma de las líneas batimétricas adyacentes.

Las líneas batimétricas obtenidas se muestrearon cada 10 m (igual que los datos acústicos depurados) y los vértices resultantes se añadieron como datos de

³Esta capa está disponible para su descarga en <http://www.recursosmarinos.net>

entrada (como “transectos” sintéticos) y se utilizaron para realizar la siguiente interpolación, suavizando así los efectos de la distribución de los transectos. Después de esta corrección, los errores de la batimetría se calcularon y la nueva batimetría se aceptó sólo si los errores de validación y validación cruzada disminuían. Si es necesario este proceso de corrección puede realizarse varias veces.

Valoración de la precisión de la batimetría: El IHO define el TVU, o incertidumbre vertical total, como la cota de error de las profundidades reducidas (observaciones acústicas corregidas) por debajo de la cual se halla el 95 % de las distancias a la superficie batimétrica real. Evaluaremos la calidad de la batimetría interpolada siguiendo este criterio, con el fin de comparar nuestros resultados con los que daría un método de cobertura total, como una batimetría multihaz. De este modo se calcularon los cuantiles de error de interpolación para tres niveles de significación, 95 %, 90 % y 85 % comparando la batimetría interpolada con los datos de los transectos de validación. Para evitar la extrapolación de la batimetría solo se consideraron los puntos situados dentro del área contenida en la envolvente convexa definida por los transectos.

2.3. Valoración de la metodología

Dado que el objetivo de este trabajo es describir una metodología simple pero mejorada para la generación de batimetrías, especialmente adecuada para zonas costeras, su aplicación se ha evaluado en un caso práctico desde el punto de vista del tiempo requerido y los resultados obtenidos.

Caso de estudio: la Ría de Cedeira

Para probar el método se escogió la Ría de Cedeira, en la costa de Galicia (NO de España), por su variedad de características topográficas. Esta Ría (Fig. 2.2) es una de las más pequeñas de la costa gallega (693 ha), con una gran diversidad de tipos de fondo y características topográficas, incluyendo una subárea de alta pendiente donde los fondos alcanzan grandes profundidades y una área llana que contiene roca, arena y fondos fangosos (Perez-Cirera, 1975).

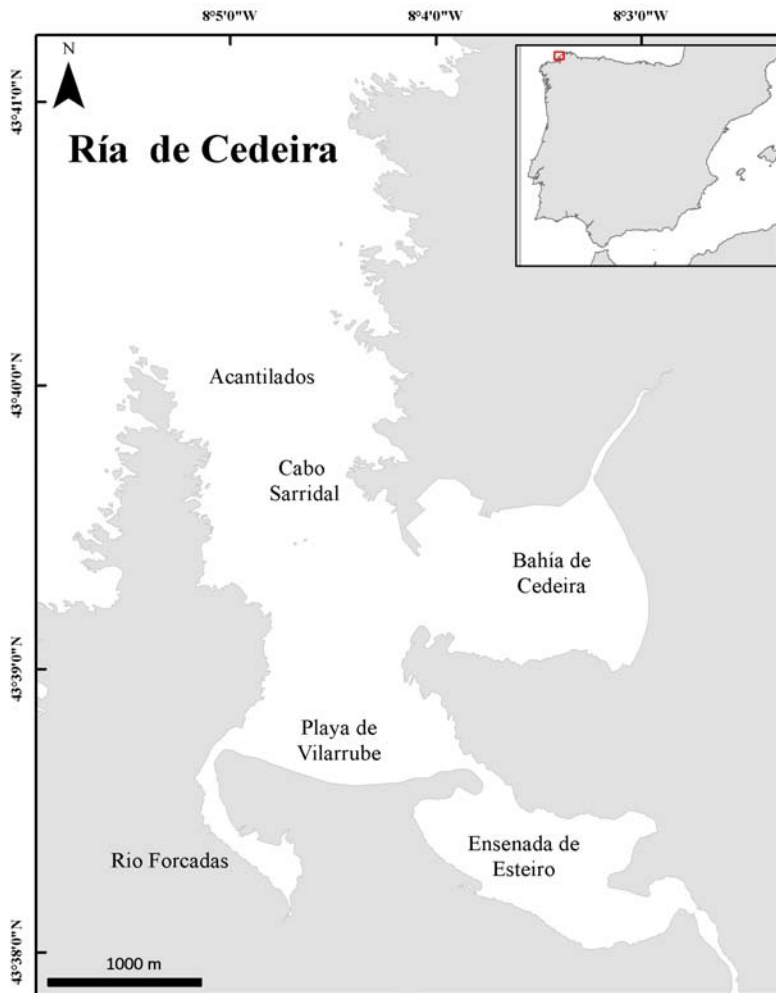


Figura 2.2: Ría de Cedeira.

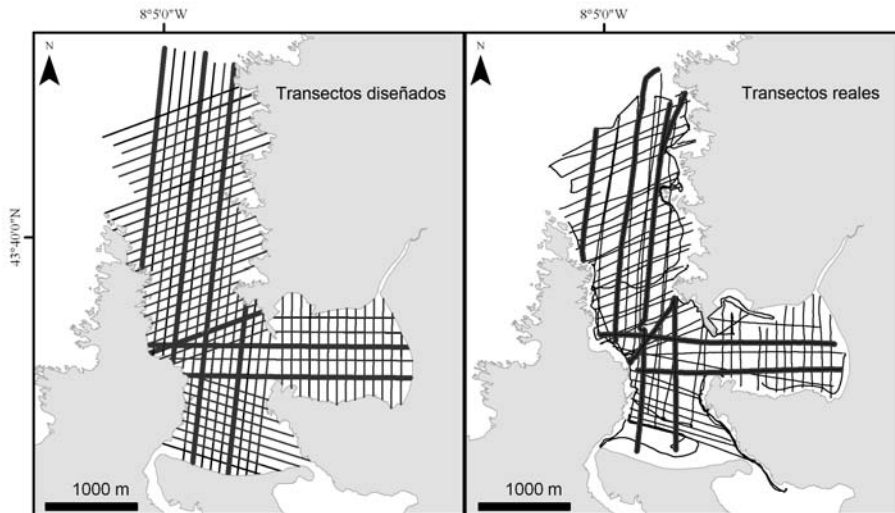


Figura 2.3: Izquierda: transectos planificados para cartografiar la Ría de Cedeira. Derecha: transectos realizados. Se destacan los transectos que fueron seleccionados para la validación de la batimetría.

Campana acústica

En la campaña llevada a cabo en la Ría de Cedeira se realizaron 47 transectos perpendiculares a la costa, con una separación media horizontal entre ellos de 150 m. Se realizaron también 15 transectos transversales con el fin de completar la batimetría cerca de la costa, así como para ayudar a la interpolación en las zonas profundas donde pueden ocurrir cambios bruscos de profundidad. Se seleccionaron 6 transectos para la validación de los resultados, que no fueron incluidos en el cálculo de la batimetría (fig. 2.3).

La ecosonda científica utilizada fue una EA400P (Simrad) portátil, trabajando con un transductor Combi-D de doble frecuencia (38 y 200 kHz) y conectada a un ordenador para la adquisición, visualización y almacenamiento de los datos. El equipo de posicionamiento fue un GPS (*Global Positioning System*) gn33 de Simrad. Todo el equipo acústico se montó a bordo de un barco de pesca de 7 m de largo. El transductor fue fijado al casco utilizando un dispositivo de acero en forma de pinza. La campaña acústica se realizó en cuatro días, del 3 al 6 de

Interpolación	ArcGIS		gvSIG	
	RBF	RBF*	UK	UK*
95 %	0,28	0,34	0,24	0,32
90 %	0,15	0,19	0,13	0,18
85 %	0,10	0,13	0,08	0,13
Media	-0,004	-0,019	-0,008	-0,003
Desv. típ.	0,408	0,249	0,191	0,274

Validacion	ArcGIS		gvSIG	
	RBF	RBF*	UK	UK*
95 %	1,67	1,63	1,84	1,75
90 %	1,12	1,10	1,08	1,01
85 %	0,83	0,77	0,77	0,73
Media	-0,092	-0,083	-0,046	-0,066
Desv. típ	0,755	0,735	0,811	0,758

Tabla 2.3: Errores de interpolación y validación (en metros) obtenidos usando los datos simulados [con las ecuaciones (2.3) y (2.4)], marcados con asterisco. También se muestran los errores previos a la simulación de Monte Carlo.

Mayo de 2008. Los transectos planeados se realizaron a una velocidad de entre 3,5 y 4,5 nudos.

El transductor trabajó a su máxima potencia y ratio de pulsos, la longitud de pulso fue de 1,024 y 0,256 ms, para las frecuencias de 38 y 200 kHz, proporcionando una precisión vertical de 0,19 y 0,048 m, respectivamente. En este trabajo solo se utilizó el canal de 200 kHz para el cálculo de la batimetría.

Batimetría resultante

El procesado y el filtrado (y la corrección de marea) proporcionaron un conjunto de 9055 puntos sobre los transectos. La simulación de Monte Carlo decuplicó este número. En general, las simulaciones de Monte Carlo aumentan el error a lo largo de los transectos debido a la varianza simulada (tabla 2.3), con un máximo de 8 cm para el método UK de gvSIG (a un nivel de confianza del 95 %). Sin embargo, en los transectos de validación se observa una disminución del error muy escasa en el RBF (de ArcGIS) y de unos 10 cm en el método

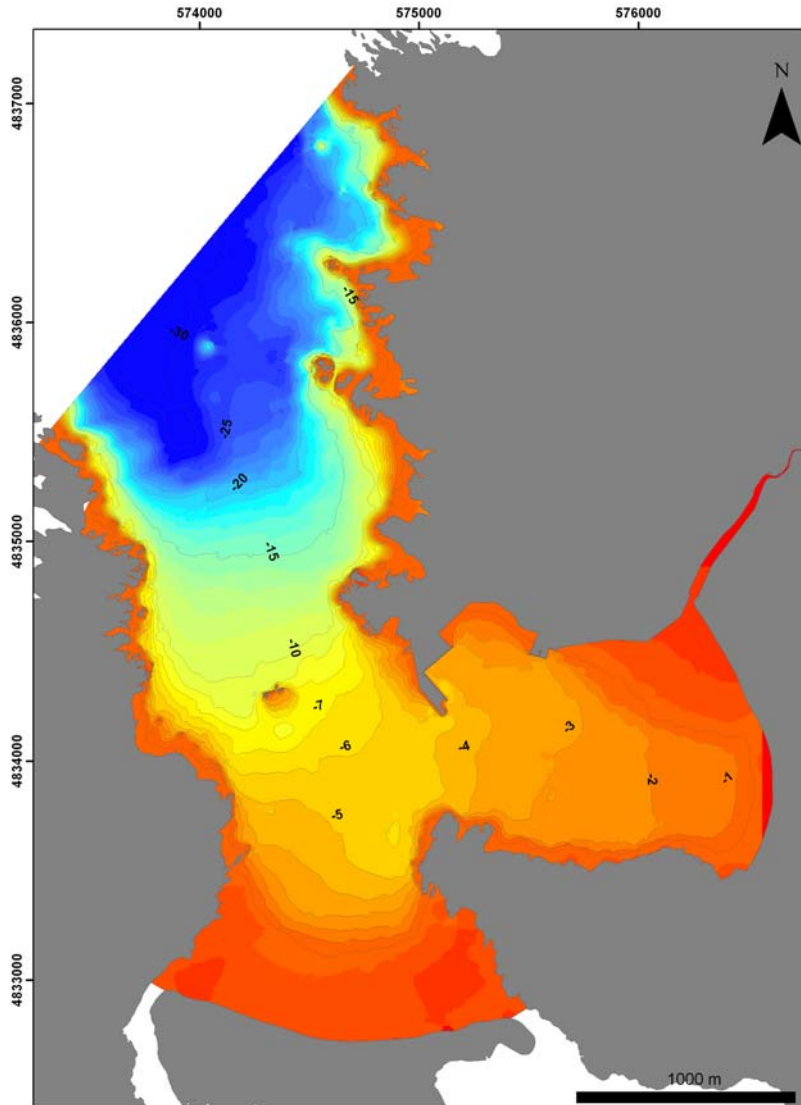


Figura 2.4: Modelo batimétrico obtenido para la Ría de Cedeira. Se muestran las líneas batimétricas superpuestas.

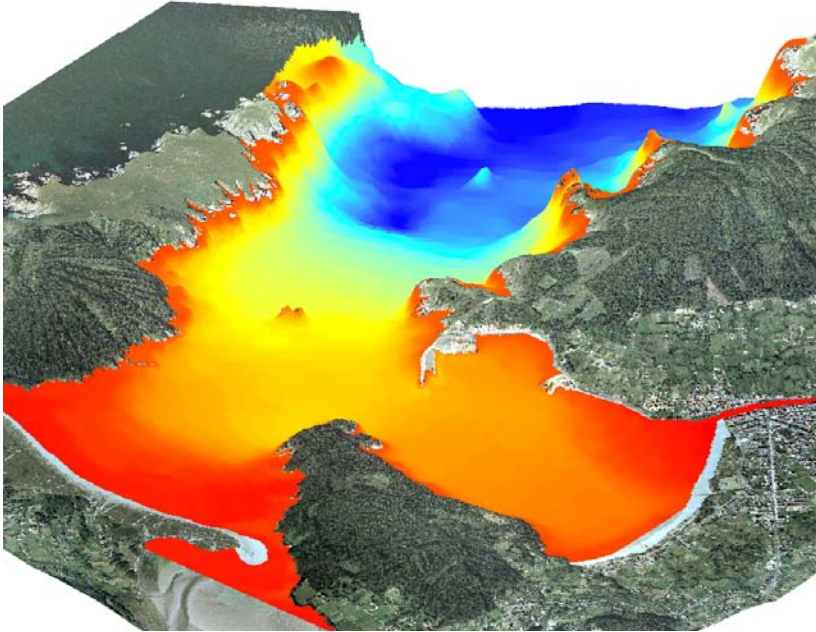


Figura 2.5: Modelo batimétrico 3-D de la Ría de Cedeira (las alturas tienen un factor de exageración de10).

UK (de gvSIG) (ambos, un nivel de confianza del 95 %). Esto muestra, no solo lo robusto de estos métodos frente al ruido en los datos, sino también que la simulación de Monte Carlo es un sistema de ponderación adecuado para incluir el error de medida en los métodos de interpolación basados en estadística como UK u OK.

De acuerdo con estos resultados, y para potenciar la replicabilidad de la metodología, se escogió el algoritmo UK de gvSIG para realizar la corrección interactiva de la batimetría. La batimetría final de la Ría de Cedeira obtenida con la metodología descrita anteriormente (interpolación con UK en gvSIG de los puntos de simulación de Monte Carlo y corrección de las líneas batimétricas), se muestra en las figuras 2.4 y 2.5: un mapa de sombras con las líneas batimétricas y una vista en tres dimensiones.

**CAPÍTULO 2. MÉTODO RÁPIDO Y DE BAJO COSTE PARA
BATIMETRÍA CON SONDA MONOHAZ**

	Distancia a la línea de costa	0-50	50-100	100- 150	150- 200	>200	Global
	N.puntos	10	63	110	158	1143	1481
Intervalo de error de la validación	0 – 0,2	0,00	0,57	0,40	0,64	0,60	0,58
	0,2 – 0,4	0,40	0,16	0,10	0,25	0,16	0,16
	0,4 – 0,8	0,00	0,13	0,18	0,06	0,12	0,12
	0,8 – 1,5	0,40	0,10	0,19	0,04	0,06	0,08
	1,5 – Inf	0,20	0,04	0,13	0,01	0,06	0,06
	Error < 1m	0,50	0,92	0,77	0,96	0,90	0,90

Tabla 2.4: Fracción de puntos en los transectos de validación dentro de los intervalos de error seleccionados, para las diferentes regiones (distancia a la costa). La fila inferior contiene la fracción de puntos con menos de 1 m de error, es decir, el nivel de confianza al cual el error de un punto elegido al azar en los transectos de validación será menor que 1 m.

La descripción cuantitativa de la validación de la batimetría, respecto a los transectos no incluidos en la interpolación, se resume en la Tabla 2.4. El área de estudio se ha dividido en 5 regiones según la distancia a la costa, que se relaciona con la incertidumbre de las mediciones y la interpolación. Los errores de interpolación y de validación en esta tabla se describen en términos del error derivado de los respectivos conjuntos de datos. Además, se calculan dos indicadores sintéticos: el error en el área de estudio completa y la fracción de puntos con errores inferiores a 1 m.

Interpretación geomorfológica de la batimetría

Mediante la interpretación del relieve de la superficie batimétrica y otras superficies derivadas de la misma (pendiente, orientación, etc.) es posible observar dos zonas claramente diferenciadas en la Ría de Cedeira, interna y externa, separadas por un salto batimétrico cerca de la profundidad de 20 m (Figuras 2.4 y 2.5), posiblemente debido a la presencia de rupturas de falla de acuerdo con la naturaleza estructural del área descrita en estudios previos en este ámbito (Nonn, 1966; Perez-Cirera, 1975).

El sector externo, 20 – 30 m de profundidad, presenta fuertes pendientes en ambas márgenes y un sector central con una pendiente ligera hasta una profundidad de 30 m, donde es casi llano. Esta zona coincide con los afloramientos

superficiales de anfíbolitas, identificados por Nonn (1966). Como la Ría de Cedeira ha sido expuesta a los efectos de la erosión y los depósitos de carácter continental durante el episodio de la última glaciación hasta el último período de subida del nivel del mar, la morfología de la parte inferior de la ría podría responder a un patrón de llanura fluvial formada durante la última transgresión marina, en la actualidad cubierto con sedimentos arenosos y fangosos (Alonso y Pagés, 2010).

El sector interno presenta una área somera de menos de 20 m de profundidad, con pendientes suaves. Las mayores pendientes en la zona interna se encuentran en los márgenes E y W, al norte del puerto de Cedeira, y en un bajo identificado en el centro de la ría, que emerge por encima del nivel del mar, formado por un afloramiento de gneis que parece originarse en Punta Promontorio y que se propaga por debajo del nivel del mar actual. En las zonas más internas, la zona de Vilarrube y la bahía de Cedeira, hay pendientes muy suaves cubiertas por depósitos sedimentarios finos (fondos fangosos y arenosos). Las diferencias de profundidad entre los sectores interno y externo podrían deberse, en parte, a diferencias en sus litologías (gneis y anfíbolitas, respectivamente).

Valoración del coste de la metodología (trabajo y tiempo)

El tiempo necesario para llevar a cabo todo el proceso de generación de la batimetría, desde la adquisición de datos a la representación, se calculó para valorar el tiempo invertido por el técnico responsable y las necesidades (de formación y equipo) requeridas en cada etapa. Los siete pasos necesarios para aplicar esta metodología en el área de estudio se resumen a continuación:

1. Campaña de campo: requirió 4 días de trabajo de un marinero y un técnico acústico. El trabajo se desarrolló, en un pequeño barco de pesca (7 m de largo) con una ecosonda Simrad EA400P.
2. Conversión y extracción de los datos: un técnico necesitó una hora para extraer los datos de la ecosonda a un ordenador (Intel Core Duo 2, 2.66 GHz, 4 Mb RAM); la conversión de los datos realizada utilizando Ecosons (software Octave) requirió, aproximadamente, 2 horas.
3. Primera interpolación: un técnico necesitó 30 minutos para transferir los datos al SIG y poner a procesar la primera interpolación (en gvSIG 1.10.0 en un ordenador con procesador Intel Core Duo 2, 2.66 GHz, 4 Mb RAM); el proceso de interpolación requirió otros 30 minutos.

4. Simulación de Monte Carlo: un técnico empleó 30 minutos en cargar los datos y realizar la simulación con el software Ecosons (software Octave).
5. Segunda interpolación: un técnico necesitó 30 minutos para cargar los datos y poner a procesar la segunda interpolación en gvSIG; el procesado, no atendido, requirió unas 17 horas más.
6. Corrección interactiva de las líneas batimétricas: un técnico SIG empleó un día de trabajo en depurar las líneas batimétricas con gvSIG.
7. Tercera interpolación: un técnico necesitó 10 minutos para poner a procesar la interpolación, incluyendo las líneas batimétricas, en gvSIG; el procesamiento, no atendido, requirió 20 horas más.

En resumen, después de 4 días de campaña realizada por un técnico acústico, la batimetría fue generada con 10,5 horas de un técnico SIG y 37,5 horas de procesamiento desatendido.

2.4. Discusión

Los métodos de interpolación más utilizados en la bibliografía son IDW, *Natural neighbour* (NN) y *Ordinary kriging* (OK) (Erdogan, 2009; Lechuga, 2010; Sterling, 2003; Liu *et al.*, 2005; Kamp *et al.*, 2005; Heyman *et al.*, 2007; Plant *et al.*, 2002; Valley *et al.*, 2005, sólo por mencionar algunos). Además de estos algoritmos generales, se han propuestos otros métodos de interpolación adaptados a los datos distribuidos en transectos, tales como la triangulación adaptada en Canepa *et al.* (2003) o el *simulated annealing* de Basu y Maczkowska (2001), sin embargo, estos métodos específicos no están habitualmente accesibles en un software SIG. Por esta razón la mayoría de los usuarios utiliza un método de interpolación de propósito general para la generación de batimetrías, añadiendo a los errores derivados de las condiciones de adquisición, los asociados al proceso de interpolación de datos no homogéneamente distribuidos.

La planificación de los transectos, la eliminación de datos erróneos, la corrección del error del GPS mediante la simulación de Monte Carlo y la corrección manual de las isobatas presentadas en este trabajo permiten obtener una superficie batimétrica de calidad, que elimina o reduce los errores y artefactos habituales en las batimetrías obtenidas con sondas monohaz. Además, el método presentado es rápido (los resultados fueron obtenidos en menos de 7 días de trabajo) y eficiente en cuanto a sus costes.

El uso de un algoritmo robusto para el cálculo de fondo y las correcciones de marea y movimiento del barco (así como la interpolación de los valores perdidos) aseguran unas medidas de profundidad depuradas y fiables dentro de los transectos, que deben ser interpoladas para obtener una superficie batimétrica continua. Los dos pasos metodológicos que se incluyen en este trabajo para la generación de esta superficie (simulación de Monte Carlo y corrección de las isobatas) representan una mejora en la batimetría resultante, tal y como se muestra en las tablas 2.3 y 2.4. La precisión de cada una de las superficies generadas en los diferentes pasos de la metodología ha sido evaluada siguiendo los requisitos de la International Hydrographic Organization (2008), en particular los de la TVU de una cobertura completa del fondo. Estos requisitos están diseñados para un propósito diferente, pensando en superficies continuas generadas por sondas multihaz, pero esta es la única evaluación realista de una superficie batimétrica interpolada (que asigna valores en aquellos puntos donde no se han realizado transectos).

Utilizando esta medida de precisión la simulación de Monte Carlo mejora la superficie obtenida en un 5,4 % (10 cm) fuera de los transectos acústicos con el método UK de gvSIG, y un 2,4 % (4 cm) con RBF de ArcGIS, ambos con un nivel de confianza del 95 %. La corrección posterior de las líneas batimétricas y la inclusión de los vértices de sus segmentos (cada 10 m) permite suavizar el efecto de la distribución de los datos en transectos y corregir errores en áreas donde la información acústica es insuficiente (cerca de la costa, por ejemplo). Esta mejora se observa en los datos de validación, donde se reduce el r.m.s en los transectos de validación (lejos de los puntos de datos originales) en un 8 %.

La metodología completa permite obtener una batimetría de calidad con un 75 % de los datos comprobados con errores inferiores a 40 cm (Tabla 2.4) fuera de la trayectoria de los transectos (sobre los transectos, el error es muy inferior), en un área con elevadas pendientes. Como se mostró en la sección anterior, esta batimetría permite la caracterización geomorfológica (a escala general) del área de estudio sumergida, lo que la convierte en una herramienta útil para estudios de dinámica litoral o gestión costera (entre muchos otros). Además, su accesibilidad (bajo coste y sencillez) y la rapidez de su implementación permiten incorporar la generación de estas batimetrías dentro de los mecanismos de monitorización continua de áreas costeras sensibles.

Los resultados obtenidos en este trabajo no pueden compararse fácilmente con otros publicados previamente, ya que es difícil encontrar en la bibliografía metodologías de generación de batimetrías que validen sus resultados utilizando transectos no introducidos en el proceso de generación. La validación cruzada

es el método más común para realizar la evaluación de la calidad de las batimetrías, pero estos resultados solo pueden interpretarse como la precisión de la batimetría dentro de la trayectoria de los transectos acústicos, y no son aplicables a la superficie batimétrica más allá de estas trayectorias. Conscientes de esto algunos autores han utilizado datos de campañas anteriores para realizar la validación, como en Poti *et al.* (2012)). En nuestro caso los transectos de validación representan un 13% del total de puntos medidos, una parte significativa de la muestra, y están homogéneamente distribuidos entre las diferentes zonas del área de estudio, por lo que la precisión obtenida con ellos puede ser asumida para toda la superficie batimétrica generada.

En términos de la IHO para la calificación de batimetrías de fondo completo, una batimetría de una zona más somera de 100 m, con los puntos batimétricos determinados con precisión de 5 m, con un 95% de los puntos dentro del error de $0,5 \text{ m} + 0,013 R_{med}$ (R_{med} es la profundidad media) y capaz de resolver obstáculos de tamaño superior a 2 m, es una batimetría de clase 1a. Una batimetría de clase 1b es equivalente pero basada en transectos, separados por entre 25 m y $3 R_{med}$. La que se ha presentado como ejemplo aquí contiene un 85% de los puntos dentro del margen de error indicado (0,75 m). Los transectos están más separados de lo requerido (150 m en lugar de 60 m). Por lo tanto, la IHO no la considera óptima para la navegación.

Sin embargo, un error inferior a 40 cm en el 75% de los puntos de la superficie batimétrica (90% inferior a 1 m) permite otros tipos de estudios como los citados en la introducción (sobre geomorfología, hidrología, procesos sedimentarios, hidrodinámica, ecología, biología pesquera, etc.) y, además, repetirlos periódicamente para realizar estudios periódicos.

2.5. Conclusiones

Se ha presentado una metodología eficiente y de bajo coste para adquirir datos acústicos y calcular una superficie batimétrica utilizando una ecosonda monohaz, software gratuito o fácilmente accesible.

Esta metodología ha sido probada en la Ría de Cedeira, un área adecuada para probar los algoritmos de batimetría costera que se presentan en este trabajo: se trata de un estuario con una topografía muy compleja, con diferentes grados de exposición al océano, diferentes tipos de costas (desde playas de arena a acantilados rocosos), pequeñas islas (más pequeñas que la resolución horizontal

esperable de la batimetría), grandes pendientes (en algunos lugares superiores al 80 % a lo largo de los transectos), y con una amplitud de marea grande (el rango mareal durante los tres días del estudio fue de alrededor de 3,50 m).

El análisis estadístico de la batimetría resultante, usando validación con datos reales extraídos del 13 % de los puntos batimétricos (no utilizados en la interpolación), ha mostrado que con la metodología se obtiene una batimetría de la Ría de Cedeira con 1,7 m de incertidumbre (al 95 % de confianza), equivalentes a 70 cm r.m.s. Esta validación con medidas reales permite comparar los resultados interpolados con los que exigiría la IHO para una batimetría de “fondo completo” de Orden 1: la batimetría obtenida tiene el 85 % de los puntos de validación dentro de los límites del IHO, frente al 95 % que se debería haber proporcionado una batimetría hecha con una sonda multihaz.



Una corrección de potencia y longitud de pulso mejorada para la clasificación acústica de fondos marinos en zonas costeras

En el marco de un estudio de caracterización de la Ría de Cedeira (promovido por la Cofradía de Pescadores que faena en sus aguas y desarrollado por FISMARE Innovación para la Sostenibilidad S.L.) para el diseño y futura implantación de un Área Marina Protegida de Interés Pesquero (AMP), se realizó una campaña acústica de cartografiado de hábitats bentónicos. En la campaña se utilizó una sonda monohaz y los datos se analizaron siguiendo una metodología y utilizando un software desarrollados para este trabajo. Se implementó una nueva corrección de la señal acústica que permitió obtener buenos resultados en la cartografía de fondos con sistemas de bajo coste, eliminando los problemas asociados a las diferencias de profundidad.

En este trabajo se presentan las correcciones aplicadas sobre los datos acústicos y se muestra su efecto sobre los ecos obtenidos de diferentes fondos y profundidades. Los datos corregidos son utilizados para realizar una cartografía de los fondos hábitats bentónicos de la Ría de Cedeira.

Este trabajo ha sido enviado para su publicación a la revista ICES Journal of Marine Science, con el título: “A power and pulse length echo correction to improve energy based seabed classification in coastal areas”.

3.1. Introducción

Los métodos acústicos se han aplicado ampliamente para la clasificación de fondos marinos (Kenny *et al.*, 2003). Actualmente los sistemas multihaz se consideran el método de referencia de clasificación de fondos, junto con los sónares de barrido lateral. Ambos sistemas proporcionan una cobertura completa del fondo marino para distinguir tanto reflectancias como texturas, estas últimas, habitualmente mediante interpretación visual.

Los sistemas acústicos monohaz también han sido empleados desde hace tiempo para la clasificación de fondos. Además de los profilómetros que recogen información de las capas de sedimento y roca bajo el fondo, se han empleado también sondas monohaz de uso común. En particular, las ecosondas científicas calibradas permiten la medida precisa de las amplitudes de dispersión (*scattering strength*) de los fondos (Manik *et al.*, 2006). Las respuestas temporales también se han usado a través de las características cualitativas de los pings (calculando sus momentos, los coeficientes wavelet, la dimensión fractal, etc.) que se han relacionado con los distintos tipos de fondos presentes en las zonas de estudio (Tegowski *et al.* (2003); vanWalree *et al.* (2005)).

Para clasificar el fondo marino a partir de su respuesta acústica, los ecos procedentes de los diferentes fondos (que dependen, sobre todo, de la profundidad a la que estos se encuentran) deben primero hacerse comparables. Este primer paso se denomina corrección y trata de compensar las pérdidas de potencia (*power adjustment*) y la distorsión temporal (*time adjustment*) de los ecos recibidos. El objetivo de este artículo es, precisamente, mejorar esta última corrección, que es la más importante, sobre todo, en las zonas con grandes cambios de profundidad, como las áreas costeras.

Formación de un ping

Una ecosonda monohaz genera ondas acústicas que se propagan con simetría esférica a partir del transductor, viajando a la velocidad del sonido en el agua, $c \simeq 1500$ m/s. La mayor parte de la energía potencia emitida (hasta el 94% en el caso de un haz gaussiano de 7° de amplitud, que corresponde a una directividad máxima de 28 dB) se dirige dentro del lóbulo principal de su diagrama de directividad. La potencia es emitida durante un tiempo τ , lo que produce un pulso de longitud $l = c\tau$. Este paquete de ondas alcanza el fondo y el volumen debajo de éste, y se refleja o retrodispersa, de nuevo, hacia el transductor, el

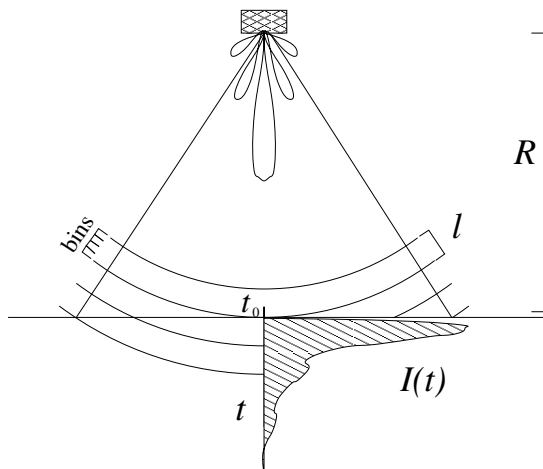


Figura 3.1: Propagación de un ping y formación del eco como resultado de la interacción con el fondo. El fondo se halla a una distancia R del transductor y es alcanzado por la onda esférica en el instante $t_0 = R/c$. La longitud del pulso es $l = c\tau$ y será recibido como bins que corresponden a fracciones de la duración del pulso original, τ . La insonificación progresiva del fondo por el frente de la onda produce el eco que se registra como una señal $I(t)$ en el transductor.

cual, muestrea la onda de presión que le llega (promediándola para convertirla en intensidad acústica) en intervalos de tiempo o *bins*, de duración δt (por lo general, $\delta t = \frac{1}{4}\tau$) (véase la figura 3.1).

La potencia total reflejada cumple la ecuación del sónar, que incluye la dependencia con la distancia (al transductor) R causada por la expansión de la onda esférica, $-20 \times \log_{10} R$, y por la atenuación de ésta en el agua, $-2\alpha_w R$ (término que se puede despreciar en el caso de aguas someras). Los términos de corrección de la intensidad acústica que incluyen no sólo la profundidad, sino el tiempo contado a partir del tiempo de incidencia de la onda sobre el fondo, t_0 , no son tan fáciles de calcular, debido a la finitud de la longitud de pulso que no suele escalar con la profundidad (en ese caso, la corrección sería mucho más fácil, como apuntó (Pouliquen, 2004)).

Según se expande la onda acústica, las partes laterales del lóbulo principal, y los lóbulos laterales del diagrama de directividad, producirán la cola del ping recibido. En el caso de un diagrama con directividad alta, la diferencia entre

el lóbulo principal y los laterales será muy grande. En profundidades someras, o con longitudes grandes del pulso o de los tiempos de muestreo, los lóbulos laterales se fundirán con el lóbulo principal. La señal reflejada procedente de los lóbulos separados más de 60° del central no será observable ya que entonces estará llegando el segundo eco (reflejado dos veces en el fondo, después de una reflexión en la interfase agua-aire).

Se ha investigado mucho la respuesta acústica del fondo marino (Jackson y Ivakin, 1998; Bergem *et al.*, 1999; Pouliquen *et al.*, 1999; Pouliquen, 2004; Manik *et al.*, 2006; Ainslie, 2008, por citar algunos). Resumiendo, la respuesta acústica es lineal, la correspondiente a la interfase entre dos líquidos con diferentes impedancias acústicas; no se propagan ondas transversales de amplitud significativa bajo el fondo marino. La reflectancia acústica depende del cociente entre las impedancias de los dos medios, del ángulo de incidencia, de la rugosidad de la interfase y del coeficiente de absorción del lecho marino. Todos estos factores se han analizado y es posible calcular, a partir de ellos, la respuesta acústica total pero, exceptuando algunos intentos (como los de Sternlicht y de Moustlier, 2003; Simons *et al.*, 2009; Snellen *et al.*, 2011) no hay ningún método aceptado para resolver el problema inverso, esto es, para determinar las características del fondo marino a partir de su respuesta acústica.

De todos modos, el objetivo de la mayor parte de estos trabajos, no es caracterizar físicamente las propiedades acústicas del fondo marino, sino clasificar los distintos tipos de fondos presentes en una zona estudiada, basándose en sus diferentes granulometrías. De ahí, que algunas características de los ecos físicamente motivadas se hayan propuesto para distinguir entre tipos de fondos, sin necesidad de resolver el problema inverso completamente.

Clasificación de características de los pings

Orlowski (1984) introdujo el uso de las energías del primer y segundo rebotes para clasificar los tipos de fondo. Esta idea fue adoptada, posteriormente, por Voulgaris y Collins (1990) para desarrollar el sistema RoxAnn de clasificación acústica de fondos. Las energías del primer y segundo ecos (E_1 y E_2) se calculan como integrales de la potencia recibida, que después se corrigen según la profundidad usando la ecuación del sónar con la corrección $+20 \log R$. El valor de la energía del primer rebote, E_1 , denominado índice de rugosidad, será mayor cuanto mayor sea la rugosidad de la interfase, y estará relacionado con las irregularidades del fondo marino. El valor de la energía del segundo rebote,

E_2 , denominado índice de dureza, tendrá en cuenta la impedancia del lecho marino relativa a la del agua, ya que tras la doble reflexión, el frente de onda contendrá casi solamente rayos reflejados normalmente en el primer rebote (es decir, no procederá de la retrodispersión).

Los valores de E_1 y E_2 se hallan en la base de muchos métodos de clasificación que han tenido éxito identificando fondos marinos de especial interés para explotación (áreas de abundancia de bivalvos (Strong y Service, 2011)) o para su conservación (fondos de Mäerl (De Grave *et al.* (2000))). Los hábitats bentónicos en las zonas costeras también han sido clasificados en rocosos o sedimentarios, y en función de los diferentes tamaños de grano (Greenstreet *et al.*, 1997; Justy *et al.*, 2000; Bates y Whitehead, 2001; Satyanarayana *et al.*, 2007). Algunos trabajos relacionan la caracterización bidimensional $E_1 - E_2$ con los mapas de sedimentos, establecidos mediante dragas, y realizando posteriormente clasificaciones supervisadas (Serpetti *et al.*, 2011). Muchos otros han empleado métodos de clasificación no supervisada, en los que los pings son asignados a clases no identificadas basándose en las semejanzas entre sus características; posteriormente esas clases son interpretadas a la vista de los datos de campo disponibles. El número de clases más común ha sido de 4, aunque algunos métodos supervisados han llegado a distinguir hasta 12 (Serpetti *et al.*, 2011). Los resultados obtenidos muestran buena precisión (porcentaje de coincidencias) de las clasificaciones respecto a los datos de verificación, sin embargo, casi nunca se calculan índices de concordancia (que tienen en cuenta los errores estadísticos de Tipo II).

La riqueza de características que se pueden extraer de la señal del ping del primer eco, originado por la reflexión, penetración, retrodispersión e interferencia coherente (que aparece como *speckle*) en la superficie, sugiere estudiar los pings basándose en estas características. Un primero paso es determinar la distribución temporal de la potencia recibida a los largo del eco, midiendo la duración de este (Biffard *et al.*, 2010) o los momentos de la energía. En particular, el sesgo de la distribución parece estar muy correlacionado con la granulometría (vanWalree *et al.*, 2005). Se pueden obtener más descriptores usando las transformadas de Fourier o wavelet del eco tal como se usan en el software QTC (Prager *et al.*, 1995; Preston *et al.*, 2001) o, como sugiere Tegowski *et al.* (2003), calculando los momentos de Fourier o la dimensión fractal wavelet. El análisis estadístico multivariante de estas características suele incluir una reducción de la dimensionalidad (PCA) y algún tipo de análisis de conglomerados visual o algorítmico, supervisado o no supervisado.

Las ecosondas monohaz son todavía la mejor opción en términos de coste-

eficiencia, pero también se han empleado otros métodos como el sónar de barrido lateral (side-scan sonar, SSS) o el multihaz (multi-beam, MB), que proporcionan resultados similares (Parnum *et al.*, 2008; Schimel *et al.*, 2010). Los trabajos que usan SSS han sido populares para clasificaciones de fondos basadas en características geomorfológicas que distinguen formaciones geológicas u otras características texturales del fondo marino, a menudo mediante inspección visual (McRea *et al.*, 1999; García-Gil *et al.*, 2000; Brown *et al.*, 2002). Los métodos multihaz proporcionan los resultados más detallados (Dartnell y Gardner, 2004; Lamarche *et al.*, 2011). Se basan en el análisis de la amplitud de retrodispersión (*backscattering*) y aprovechan la capacidad de las sondas multihaz para cubrir la totalidad del fondo, generando clasificaciones con porcentajes de exactitud superiores al 80 % (Serpetti *et al.*, 2011). A pesar de algunas críticas relativas a su precisión (véase el estudio comparativo de Schimel *et al.* (2010)), este método se podría considerar el método estándar de clasificación en zonas profundas (en las zonas someras el recubrimiento del fondo se ve limitado por la profundidad) pero está todavía limitado por el alto coste y los requerimientos técnicos para realizar la corrección o la clasificación de fondos marinos (Lefebvre *et al.* (2009)).

Objetivo

El objetivo de este trabajo es presentar un nuevo método de corrección de *pings* acústicos adecuada para llevar a cabo clasificación de hábitats bentónicos en zonas costeras, donde las variaciones de profundidad son habitualmente un problema. Basaremos la corrección en el modelo más básico de formación de ecos, que permite hacer referencia a los valores de la intensidad total del eco a una profundidad de referencia. Nuestro objetivo será el de comparar las características de los ecos corregidos obteniendo una clasificación de los hábitats bentónicos.

La estructura de este documento es la siguiente. En primer lugar vamos a describir el área de estudio y las campañas de adquisición de datos (acústicos y mediante buceos). A continuación vamos a exponer el método de corrección: i) una delimitación sencilla del eco, ii) implementación de las correcciones de tiempo, energía y longitud de pulso (*time adjustment*, *power adjustment* y *pulse length adjustment*) derivadas de la profundidad, para permitir la comparación de ping y iii) cálculo las variables mejoradas de reflexión del fondo (E_1 , E_2 y variables derivadas). Por último se ilustrará el potencial del método de corrección presentado (y de las variables utilizadas) mediante la clasificación de

los hábitats bentónicos en una zona costera, con diferencias de profundidad importantes y cambios rápidos de tipo de fondo.

3.2. Area de estudio y toma de datos

El área de estudio fue la Ría de Cedeira (véase la figura 3.2), una de las rías más pequeñas de la costa gallega (693 hectáreas). Esta ría cuenta con una gran diversidad de fondos, en cuanto a su topografía y tipos de sustrato. Así incluye una subárea rocosa con pendiente elevada (hasta 36%) donde la profundidad alcanza los 50 m, áreas arenosas de profundidades medias (~ 20 m) con pendientes relevantes (hasta 10%) y áreas muy planas en zonas poco profundas (< 10 m) con sustratos rocosos, arenosos y fangosos (Perez-Cirera, 1975).

La campaña acústica se llevó a cabo entre el día 3 y el 6 de mayo de 2008, siempre con buenas condiciones meteorológicas. Se realizaron un total de 62 transectos acústicos cubriendo toda la ría: 47 transectos perpendiculares a la línea de costa (con una separación media horizontal entre ellos de 150 m) y 15 transectos cruzados (representados en la figura 3.2).

Los datos acústicos fueron adquiridos con una ecosonda monohaz (EA400P Simrad), que trabajaba con un transductor bifrecuencia (38/200 kHz). Este transductor se instaló ajustándose a la parte superior del casco de una embarcación pequeña (6,95 m). Las frecuencias de 200 kHz y 38 kHz trabajaron con una longitud de pulso de $256 \mu\text{s}$ y $1024 \mu\text{s}$ respectivamente. Ambas frecuencias trabajaron con una potencia de emisión máxima (1 kW) y una tasa de muestreo de 1 ping/s. La velocidad de la embarcación se mantuvo entre 4 y 4,5 nudos.

Buceos

Para validar la clasificación obtenida con los datos acústicos se realizaron 20 transectos de buceo, de 200 m cada uno, en el área de estudio (figura 3.2). Estos transectos se situaron principalmente cerca de la costa, con el fin de capturar la mayor variabilidad posible que aparece en esta zona.

Los transectos de buceo se diseñaron aproximadamente perpendiculares a la costa, entre los 5 y 25 m de profundidad. A partir del inicio de cada transecto, se lanzó desde la embarcación una cuerda plomada, con marcas cada 5 m, hasta llegar al punto final del transecto. Los buceadores realizaron los transectos anotando todos los cambios observados en el tipo de sustrato (roca, arena,

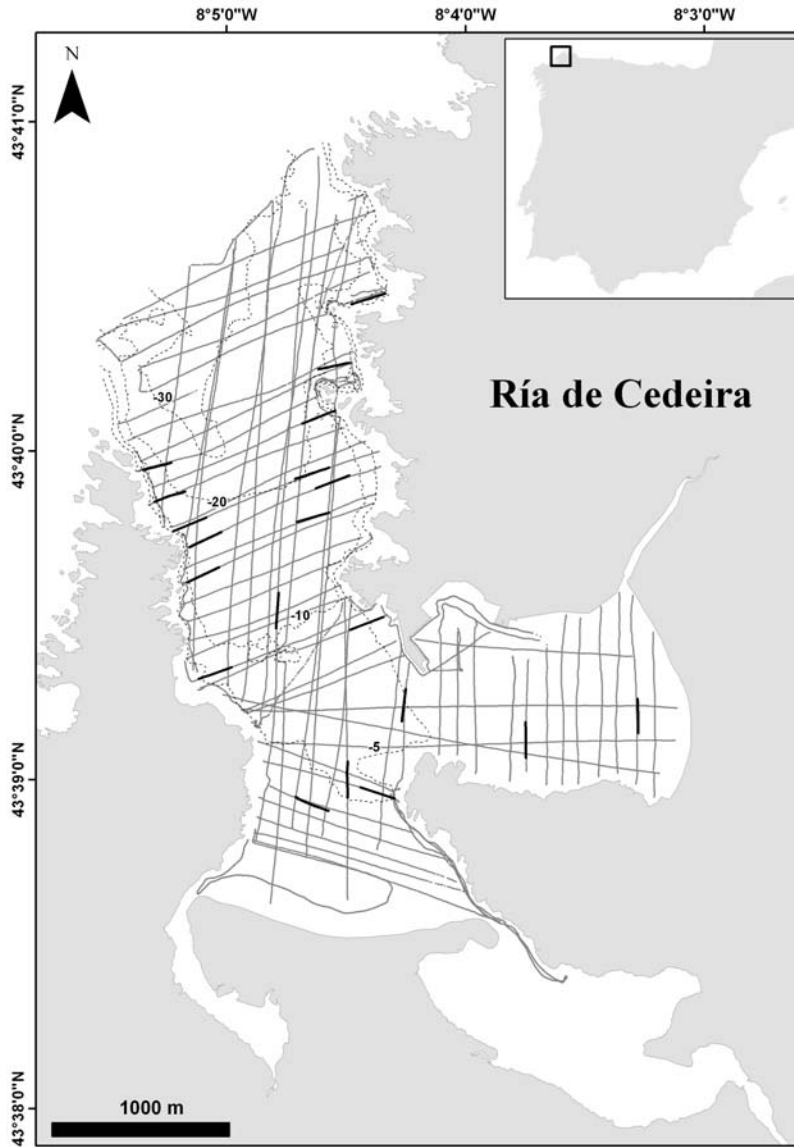


Figura 3.2: Área de estudio. Se muestran los transectos acústicos (líneas grises punteadas) y los transectos de buceo planificados (líneas negras sólidas).

fango), presencia de algas, etc. Durante la realización de estos transectos se recogieron 25 muestras de sedimento con *corers*, para caracterizar cada uno de los segmentos homogéneos (de arena o fango) de los transectos. Estas muestras fueron secadas y clasificadas por su tamaño de grano para determinar la granulometría de cada una según la clasificación de Folk (Jackson y Richardson, 2007).

La granulometría de cada uno de estos *corers* fue asociada a los segmentos de los transectos de buceo y toda la información relativa a los mismos fue volcada en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para su utilización en la validación de los datos acústicos.

3.3. Métodos

Todos los procesos llevados a cabo en este trabajo para cumplir con los objetivos propuestos, desde el procesamiento de los datos acústicos y el análisis estadístico de las variables, hasta el trabajo con información geográfica, se han realizado utilizando software libre. El uso de software de código abierto garantiza el verdadero análisis científico de la metodología, sin pasos ocultos o *cajas negras*. La manipulación de datos acústicos (importación, corrección y extracción de características) se implementó en un programa en Octave, *Ecosons bottom classification* (disponible en <http://www.recursosmarinos.net/downloads>). Los análisis estadísticos multivariantes, incluyendo la clasificación, se realizaron con el paquete R. Por último, la gestión de la información geográfica, así como la generación de los mapas, se realizaron utilizando *gvSIG*.

DetECCIÓN DEL FONDO

Para comparar *pings* de diferentes profundidades es necesario primero realizar una localización del fondo que permita alinearlos y delimitar la duración del eco. En la bibliografía científica se han propuesto dos soluciones (Sterling, 2003): la alineación del máximo y la alineación por umbral. La alineación del máximo busca el valor máximo de intensidad de cada *ping* y hace corresponder los *bins* de los *pings* a partir de este. La alineación por umbral busca en cada *ping* el *bin* que tenga un valor de intensidad unos decibelios menor al máximo, y hace corresponder los *bins* de los *pings* a partir de ese punto.

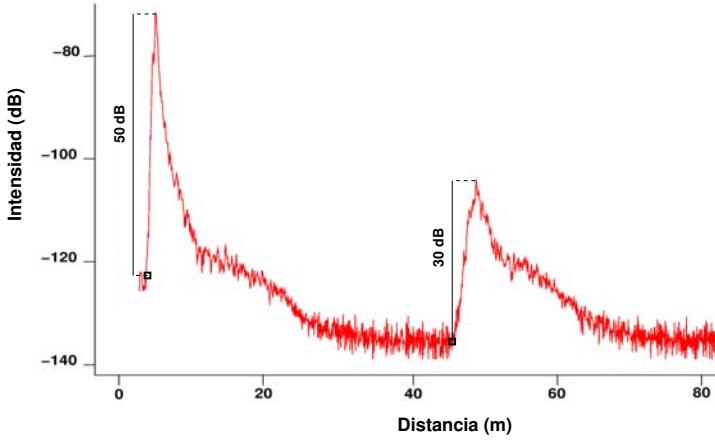


Figura 3.3: Localización de los ecos: (a) primer eco, (b) segundo eco.

En este trabajo utilizamos un algoritmo de umbral para la detección de fondo, ya que es más fácil de aplicar e interpretar geoméricamente (véase la figura 3.3). El comienzo del primer eco del *ping* será localizado en el *bin*, previo al máximo, con un valor de intensidad 50 dB menor que el máximo. El final del eco será determinado geoméricamente, como dos veces la distancia del transductor al fondo (inicio del primer eco). El comienzo del segundo eco será localizado del mismo modo que el primer eco, solo que en este caso, la diferencia en dB desde el máximo será de 30 dB. Ambos umbrales (50 dB y 30 dB) se determinaron empíricamente y pueden ser distintos cuando se utiliza otra sonda, o con otras características de la columna de agua o profundidades.

Correcciones de profundidad

Como se explicó anteriormente, para poder comparar los *pings* obtenidos de fondos a diferentes profundidades, cada uno de los ecos debe ser transformado a una profundidad de referencia, obteniendo un eco con la forma que habría tenido (en función de las características de la onda y el fondo) si hubiese sido tomado a esa profundidad. Con la corrección ideal, dos *pings* registrados sobre el mismo tipo de fondo y pendiente, obtenidos a diferentes profundidades, podrían representarse exactamente iguales (dentro de la incertidumbre experimental).

El proceso de corrección se realiza en tres pasos: corrección de tiempo (*time adjustment*), corrección de energía (*power adjustment*) y corrección de la longitud del pulso (*pulse length adjustment*) (ver figura 3.5).

En primer lugar se realiza la corrección de tiempo (*time adjustment*) para lo que se selecciona un valor de profundidad (R_0) suficientemente alto en comparación con las profundidades de los pings que se van a analizar (en nuestro caso $R_0 = 30$ m). Todos los primeros ecos de los pings son “estirados” para ajustarse a la longitud correspondiente con esta profundidad (R_0), interpolando los valores de sus *bins* para obtener un número de *bins* igual a $2R_0/(c\delta t)$.

La energía de los pings “estirados” es corregida (*power adjustment*) para hacer corresponder las pérdidas de energía (debidas al *spreading* y a la atenuación de la onda) con las sufridas en caso de corresponder con una profundidad de referencia (R_{ref}). Esta profundidad será definida como la menor contemplada en el área de estudio (pings con profundidades $< R_{ref}$ serán descartados). Para realizar la corrección de energía, a cada *bin* se le añadió el valor de corrección $30 \times \log_{10}(R/R_{ref})$ (Clarke y Hamilton, 1999).

Como sugiere Pouliquen (2004), la longitud finita del pulso (τ) requiere ajustes adicionales a los dos previos. En particular, dicho autor sugiere utilizar pulsos de longitudes variables, dependientes de la profundidad del fondo ($\tau(R) = (R/R_{ref})\tau_{ref}$), más largos cuanto mayor sea la profundidad. La corrección presentada aquí intentará simular ese “alargamiento” de los pulsos de *pings* con profundidades mayores: simularemos una corrección de alargamiento de *ping* de Pouliquen (*ping-length Pouliquen (PLP) correction*).

En primer lugar, observamos que la intensidad de un *ping* $I(t)$ puede calcularse como la convolución de la señal de un pulso emitido $W(t)$ con una duración τ , con una función de respuesta del fondo, $G(ct/d)$ que geoméricamente depende del cociente entre la distancia recorrida por la onda (ct) y la profundidad del fondo (d), y corresponde al eco ideal de un pulso de duración infinitamente pequeña reflejado por ese tipo de fondo (Pouliquen y Lurton, 1992)

$$I(t) = W * G(t) = \int_0^{\min(t,\tau)} W(t-t')G(ct'/d) dt' \quad (3.1)$$

Entonces, para simular la corrección PLP de un eco en una zona profunda (a profundidad R_1), podemos convolucionar la intensidad recibida del ping con un elemento de estructura elegido adecuadamente, $W'(d, t)$, de modo que el eco tras el ajuste de tiempos sea semejante a otro medido en una profundidad de

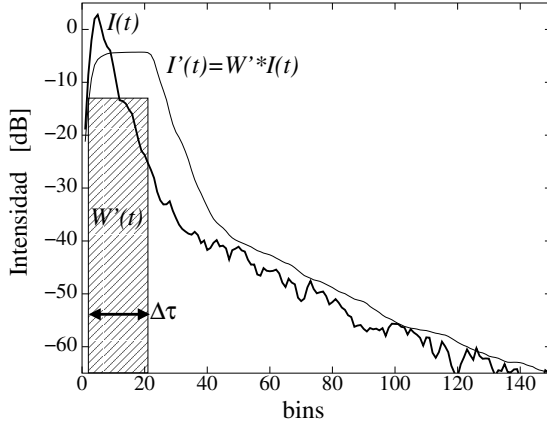


Figura 3.4: Corrección del ping con un ensanchamiento simulado por convolución.

referencia R_{ref} más somera ($R_{ref} < R_1$). Si la longitud del pulso del ping a la profundidad de referencia R_{ref} es $\tau_{ref} = \tau$, entonces la longitud del pulso sugerida por Pouliquen para el ping a profundidad R_1 sería $\tau_1 = (R_1/R_{ref})\tau_{ref}$, esoto es, el pulso a simular deberá ser alargado una cantidad $\Delta\tau_1 = \tau_1 - \tau_{ref}$ respecto al realmente medido. Este alargamiento se simulará aquí usando como elemento de estructura una señal rectangular de duración $\Delta\tau_1$ y altura $1/\Delta\tau_1$, que garantiza la conservación de la energía y que, aunque no proporciona la solución exacta al problema, sí es numéricamente conveniente (véase la figura 3.4). Es más adecuado realizar estas operaciones en la representación de tiempo ajustado a la profundidad R_0 , teniendo en cuenta que entonces todos los tiempos (y los bins correspondientes) se deberán rescalar por R_0/R_1 para un ping a profundidad R_1 .

La corrección PLP del segundo eco es similar, sólo teniendo en cuenta que el rango de profundidad es doble. La figura 3.5 resume los 3 pasos de la corrección PLP.

Cálculo de variables

Variables energéticas Las variables E_1 y E_2 pueden calcularse como la integral de la intensidad del primer y segundo eco. Sin embargo, la integración completa, incluyendo el comienzo del primer eco (E_1), contiene mucho ruido.

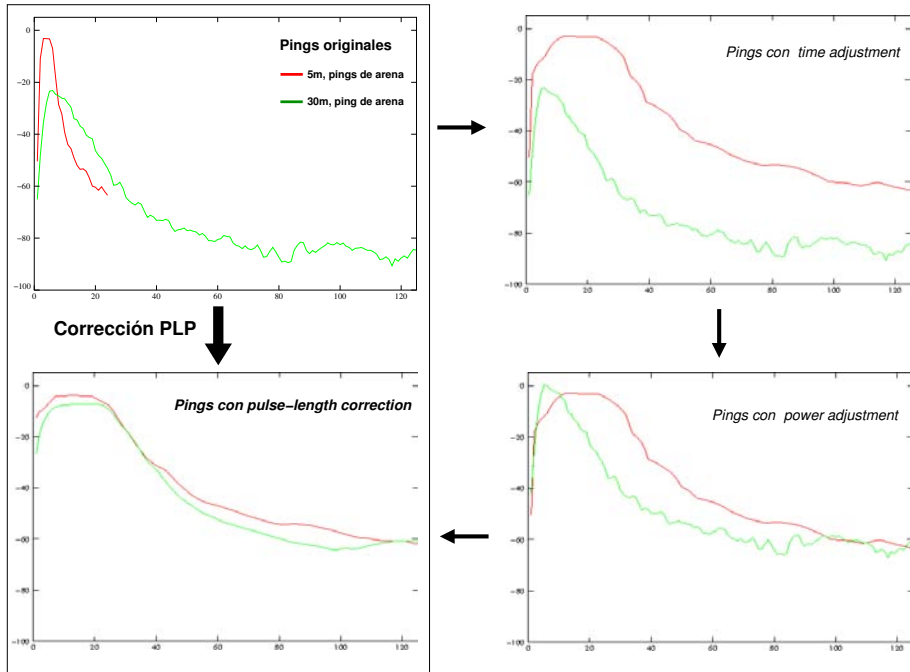


Figura 3.5: Diagrama de los pasos de la corrección de PLP.

Esto se debe a las variaciones de la intensidad debidas al ángulo de inclinación del lóbulo principal, así como al ruido de superposición coherente (*speckle*), que es mayor en los *bins* cercanos al máximo de intensidad. Para evitar estas variaciones, la primera parte de cada eco debe ser eliminada (como se explica en Heald y Pace, 1996 para E_1).

Para determinar la parte del eco que menos contribuye a esta variación, la energía de la cola del eco fue calculada incluyendo sólo un porcentaje de los *bins*. El porcentaje de *bins* de la cola que serán finalmente utilizados para definir las variables fueron determinados mediante el cálculo de la variabilidad de la energía entre *pings* vecinos. El siguiente valor fue calculado para los N pings de cada transecto

$$\delta E_B = \frac{1}{N} \sum_i^N |E_{B,i+1} - E_{B,i}| \quad (3.2)$$

donde $E_{B,i}$ es la energía del eco contenida en los B últimos *bins* del i -ésimo *ping*.

Los rangos de *bins* seleccionados fueron aquellos que minimizaban el valor de δE_B . Aunque no existe un mínimo absoluto, se observó que alrededor del 50 % (para la señal de 38 kHz) y del 80 % (para la de 200 kHz) del final del eco proporcionaban una variabilidad mínima tanto en el primer como en el segundo eco. Denotaremos estas integrales de energía como $E_{50\%}$ y $E_{80\%}$.

Finalmente, se calcularon tres integrales de energía para cada eco: $E_{100\%}$, incluyendo todos los *bins*, $E_{50\%}$ (or $E_{80\%}$), incluyendo el 50 % (o 80 %) final del eco y $E_{70\%}$, incluyendo el 70 % final. Las variables $E_{100\%}$ y $E_{70\%}$ se incluyeron con el fin de comprobar estadísticamente si proporcionan o no información relevante para la clasificación final.

Variables topográficas. Dado que la forma del eco y el tipo de sustrato del fondo son ambos dependientes de la topografía del terreno, la pendiente del terreno, S (calculada a partir de la batimetría del capítulo 2) fue incluida también como otra “variable de adquisición” para el análisis estadístico.

Tratamiento de las variables

Teniendo en cuenta la variabilidad inherente a una campaña acústica, los datos fueron promediados de dos maneras diferentes, con el fin de garantizar la coherencia del método y evitar los sesgos inducidos por el proceso de adquisición de los datos a lo largo de transectos. En primer lugar, como es habitual, se promediaron varios pings consecutivos a lo largo de un transecto. En segundo lugar, se interpolaron los valores de las variables generando una malla regular que cubría la totalidad del área de estudio.

Promedio de variables. Los valores de los datos de intensidad acústica se promediaron para cada grupo de 20 *pings* consecutivos dentro de un transecto (que corresponde a unos 50 m). A partir del primer y segundo ecos corregidos

de 20 *pings* se obtiene un *ping* promediado. Este *ping* se calcula como aquel resultante de la media (de los *bins* alineados) del 63% de los *pings* (13 de 20) con diferencias menores entre ellos que el 37% restante. Las variables definidas en el apartado anterior son calculadas para estos *pings* promediados, mientras que la pendiente se toma como la pendiente media en el centro del intervalo.

Variables interpoladas en una malla regular. Los valores de las variables calculados para los *pings* promediados fueron interpolados en el área de estudio utilizando el método geostadístico *kriging ordinario*. A partir de las superficies obtenidas se extrajeron los valores para los puntos de una malla regular (espaciados 20 m de sur a norte y 50 m de este a oeste).

Clasificación

La clasificación de los pings acústicos promediados se realizó utilizando un algoritmo de agrupamiento (*cluster*) jerárquico (hclust del paquete estadístico R), que es un algoritmo de clasificación no supervisada. El método de agrupación utilizado fue el de *linkage* promedio y la distancia euclídea, con el fin de crear grupos redondeados alrededor de un punto representativo (el centroide del *cluster*). Como variables para el algoritmo de *cluster* se utilizaron los componentes principales obtenidos con las variables energéticas y la pendiente, que representan entre el 95 – 99% de la variabilidad total (Legendre *et al.*, 2002).

El resultado obtenido con el análisis *cluster* jerárquico es un dendrograma que puede ser dividido en ramas a diferentes niveles (dados por la distancia entre las ramas), lo que determinan el número de clases. Para descartar las clases formadas por datos perdidos o erróneos (*outlayers*), se estableció una restricción sobre el número mínimo de *pings* promediados clasificados dentro de una clase, dejando fuera a las clases con menos del 2% de los *pings*.

Esta clasificación se realizó con dos grupos de datos, los pings acústicos promediados y los puntos de la malla regular interpolada. La coincidencia espacial de los resultados mostrarán la robustez de la clasificación no supervisada.

Validación

Ya que la ubicación de *ping* promediado y transectos de buceo no coincidían exactamente en el espacio (figura 3.2), fue necesario establecer una distancia

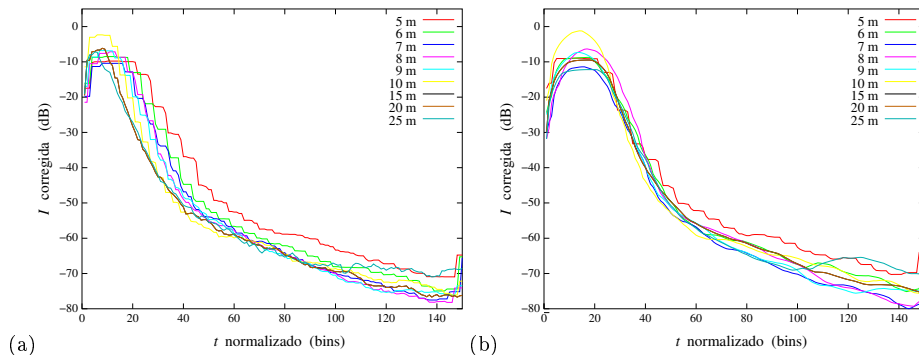


Figura 3.6: Corrección de tiempo (time adjustment) (a) y corrección PLP (b) del primer eco de fondo de arena fina medidos a diferentes profundidades.

máxima de búsqueda, definida como 50 m (aproximadamente la longitud del intervalo de promediado de pings), con el fin de comparar las clasificaciones acústicas con los datos de fondos. Se construyó una matriz de confusión, una matriz cuadrada que compara los resultados de clasificación y datos de campo categoría a categoría, y se calculó el coeficiente kappa (κ) de la matriz, utilizando las sumas diagonales y marginales (filas y columnas). Este coeficiente es un indicador de acierto muy utilizado para evaluar la significación estadística de los resultados descritos en la matriz de confusión, pues elimina la contribución aleatoria al acierto (Cohen, 1960).

La clasificación obtenida con la malla de datos interpolados se utilizó para generar un mapa temático de toda la zona. La comparación de este mapa con los datos de buceo y con la cartografía generada a partir de entrevistas con pescadores locales (Verísimo Amor *et al.* (2011)) proporcionó una validación cualitativa.

3.4. Resultados

La corrección PLP aplicada a los *pings* promediados ajusta la forma de todos los ecos correspondientes a un tipo de hábitat bentónico concreto ajustándola a la de un *ping* de profundidad normalizada (con un error experimental asociado). La figura 3.6 muestra los primeros ecos de unos *pings* (frecuencia de 38 kHz) que corresponden a arena fina (la más abundante en el área de estudio), medidos a

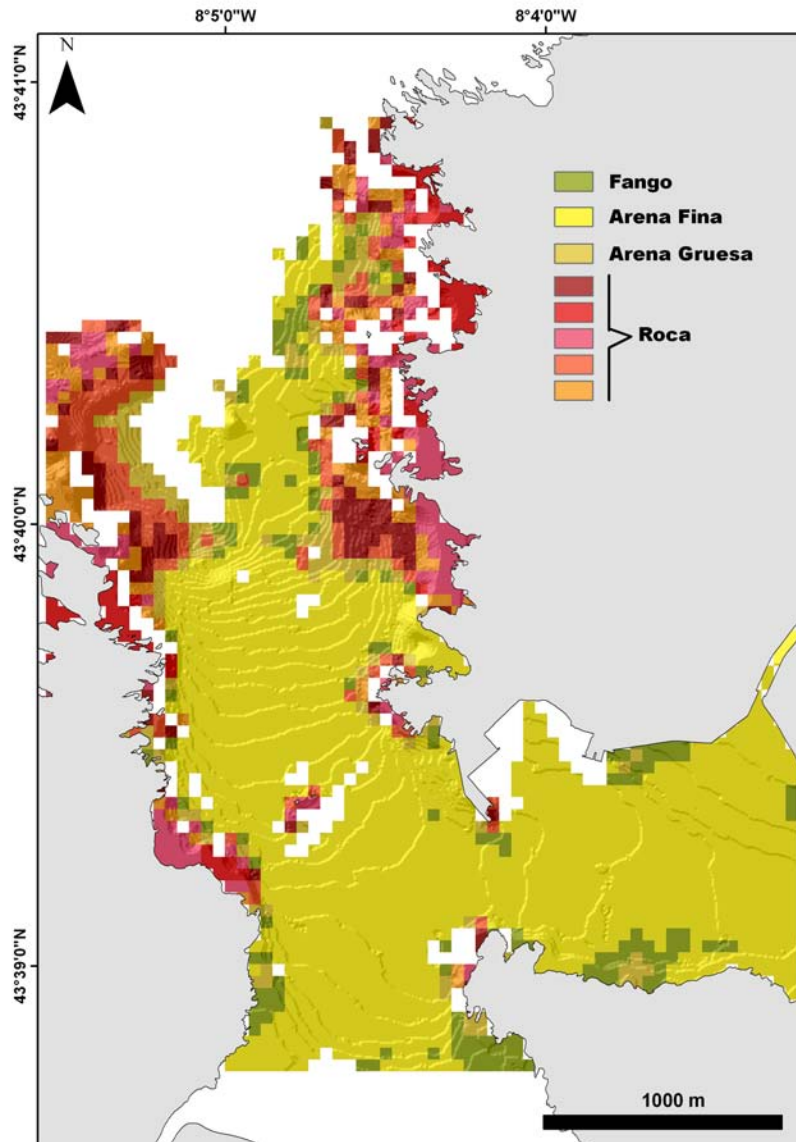


Figura 3.7: Mapa de clasificación que muestra 8 clases de la agrupación no supervisada y su interpretación.

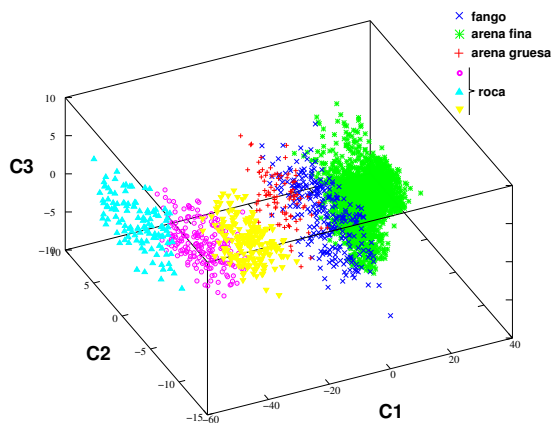


Figura 3.8: Primeiros 3 componentes principais obtidos a partir de los datos acústicos promediados.

diferentes profundidades, después de la corrección de tiempo (*time adjustment*) y de potencia (*power adjustment*) y después de toda la corrección PLP (*time adjustment, power adjustment, pulse length adjustment*). El ajuste no fue tan bueno para los *pings* rocosos, probablemente debido a la variabilidad de la forma de eco derivada de las alturas y las diferencias de pendiente en fondos rocosos.

Los resultados obtenidos con la clasificación estadística no supervisada con las variables interpoladas se muestran en la figura 3.7. Se puede observar que presentan coherencia espacial, agrupando valores cercanos dentro de la misma clase acústica en puntos geográficamente próximos (aunque no se proporcionó información espacial al clasificador).

En esta clasificación de hábitats bentónicos (figura 3.7), los fondos rocosos de los acantilados costeros se detectan claramente en las márgenes oriental y occidental de la ría. Por otro lado el área más somera está dominada por las clases de fango y arena fina, concentrándose los fondos fangosos en la zona sur de la ensenada del puerto y la arena fina en la zona de playa del sur. El área central de la ría está también dominado por arena fina, apareciendo arena gruesa en pequeñas áreas cercanas a las rocas.

Los cuatro componentes principales de las variables, que explican 97,7% de la variabilidad, seleccionan las variables estadísticamente más relevantes. Los

Transectos de buceo / Clases	1	2	3	4	5	6
Fango	0,00 %	50 %	50 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Area fina	1,65 %	86,83 %	3,29 %	0,00 %	0,00 %	1,23 %
Arena gruesa	33,33 %	8,33 %	33,33 %	0,00 %	0,00 %	8,33 %
Roca	2,13 %	1,06 %	0,53 %	17,55 %	10,64 %	19,68 %

Tabla 3.1: Matriz de validación de las clases no supervisadas obtenidas con el análisis de los pings promediados.

3 primeros componentes están representados en la figura 3.8. En el primer componente, las variables con menos peso (con menos del 5% de contribución a la varianza explicada por este componente) fueron: la pendiente, el $E_{100\%}$ del primer y segundo eco de ambas frecuencias (38 kHz y 200 kHz), y el $E_{70\%}$ del segundo eco tanto de 38 kHz como de 200 kHz. El segundo componente (con un 6% de la varianza total) corresponde a la pendiente, con una contribución de menos del 1% del resto de las variables.

Los transectos de buceo se han utilizado para relacionar la clasificación no supervisada de los datos acústicos promediados con los hábitats de fondo. Los resultados de los 341 pings promediados situados a menos de 50 m de un transecto de buceo se resumen en la tabla 3.1. Se observa que la clase no supervisada 1 corresponde a arena gruesa, la clase 2 en su mayoría a arena fina (mezclada con fango), clase 3 a fango (con un poco de arena gruesa), y el resto de las clases (4, 5 y 6) a fondos rocosos.

Con el objetivo de interpretar los resultados mostrados en la tabla 3.1, deben tenerse en cuenta algunas consideraciones con respecto a los tipos de fondo. Los puntos de validación correspondientes con arena por encima de un fondo rocoso (clasificados como arena por los buceadores) podrían encajar dentro de cualquiera de las dos clases. Por otra parte, algunos segmentos homogéneos de buceo (sobre todo, de arena gruesa) fueron muy pequeños, hasta de 2 m, por lo que la asignación de un *ping* promediado a esta clase (por ser la más cercana) no necesariamente es acertada.

Teniendo en cuenta estas consideraciones y los resultados mostrados la tabla 3.1, se obtuvo una clasificación interpretada de los cuatro sustratos: fango,

CAPÍTULO 3. CORRECCIÓN MEJORADA DE LA LONGITUD DE PULSO PARA CLASIFICACIÓN ACÚSTICA DE FONDOS

Transectos de buceo	2 i.c. Fango	3 i.c. Arena fina	1 i.c. Arena gruesa	4, 5, 6 i.c. Roca	Total
Fango	4	4	0	0	8
Arena fina	8	211	4	3	226
Arena gruesa	4	1	4	1	10
Roca	1	2	4	90	97
	17	218	12	94	341

Tabla 3.2: Matriz de confusión de la clasificación interpretada (*i.c.*, “interpretada como”).

arena fina, arena gruesa y roca. Tabla 3.2 muestra esta clasificación, a partir de la cual se obtiene un $\kappa = 0,81$ (con una precisión de 0,91).

Para interpretar y validar la clasificación acústica gráficamente, el mapa temático obtenido a partir de la malla de las variables interpoladas (figura 3.7) se comparó con el mapa de hábitats bentónicos generado con información de los pescadores locales (Verísimo Amor *et al.*, 2011) (figura 3.9). A través de una inspección visual se puede observar que no sólo los fondos rocosos son correctamente clasificados, sino que se llegan a diferenciar distintos tipos de roca (divididos en cinco clases en el dendrograma de la malla de datos interpolados), y que la ubicación de la arena y fango también se distingue por la clasificación acústica.

3.5. Discusión

La corrección PLP introducida en este trabajo resulta muy útil para corregir los *pings* promedios en aguas poco profundas, como puede verse en la figura 3.6, permitiendo obtener una clasificación final de hábitats bentónicos correcta de una zona costera con profundidades tan someras como 5 m y tan profunda como 35 – 40 m (véase el mapa en la figura 3.2). El método, tal como se aplica en este documento, tiene sin embargo una limitación: requiere realizar la corrección a una profundidad de referencia, de modo que todos los *pings* que son corregidos deben ser más profundos que R_{ref} . Esto implica que algunos *pings* de zonas muy someras deben quedar fuera de la clasificación y que algunos

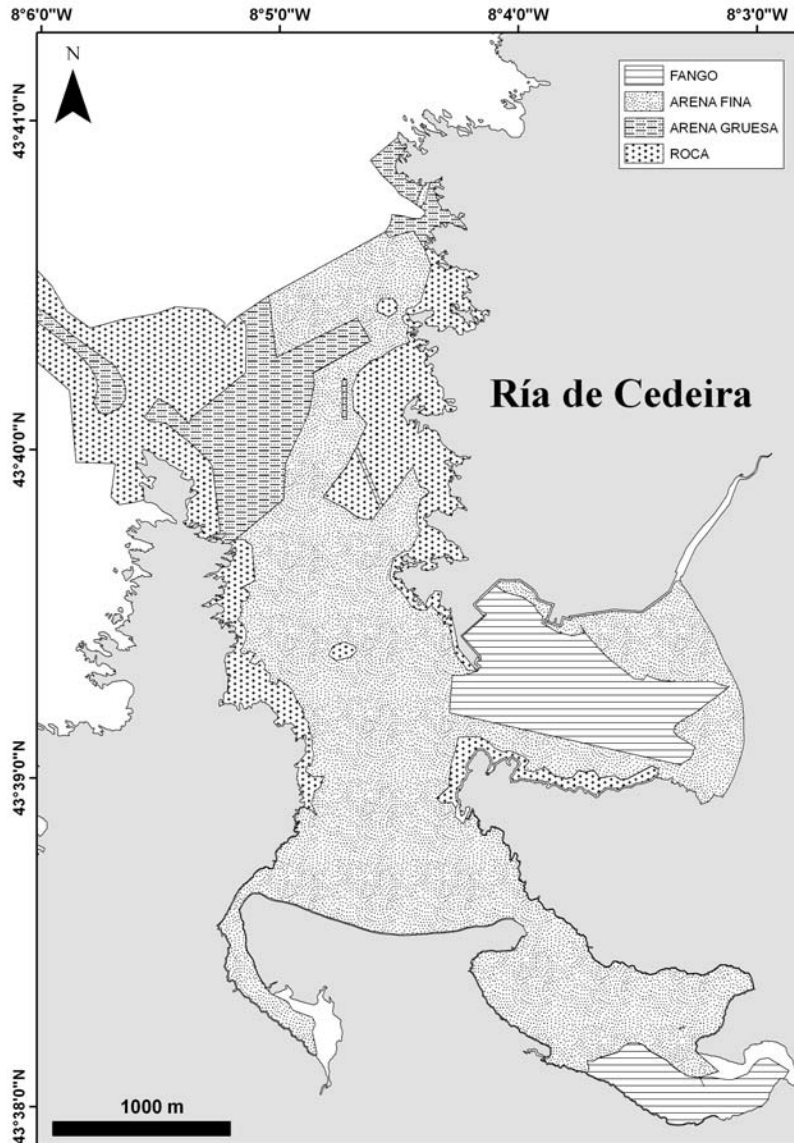


Figura 3.9: Hábitats bentónicos según los pescadores locales.

pequeños detalles de los más profundos se pierden en la convolución. La corrección de PLP, al ser una corrección energética, ignora o suaviza algunas de las características del eco, que no podrán ser observadas o analizadas después. Estas son, por ejemplo, los detalles en la forma utilizados en análisis de Fourier o de ondículas (*wavelet*) necesarios para calcular algunas de las variables descritas en Tegowski *et al.* (2003). Otras características, tales como momentos de energía o de longitud de ping pueden ser mejoradas, en la medida en que responden a la rugosidad del fondo, pero probablemente mucha información de la penetración del eco en el fondo se pierde en la convolución (debido a la prolongación del lóbulo principal causada por la convolución) para el *pings* de profundidad media. Sin embargo, estos problemas están siempre presentes dado que los ecos de profundidades muy diferentes no son fácilmente comparables. Podemos decir que la corrección PLP proporciona la mejor corrección global posible para hacer los *pings* de diferentes profundidades comparables.

Así como E_1 y E_2 tienen un significado físico, relacionado con la rugosidad y dureza, las integrales de energía parciales introducidas en este documento no son tan fáciles de interpretar. De hecho, estas integrales miden la amplitud de dispersión bajo ángulos oblicuos, pero es difícil decir si tienen mayor contribución de la rugosidad del fondo o de las diferencias de impedancia, y además, su resolución angular es dependiente de la profundidad. Es evidente, sin embargo, dada su propia definición (explicada en la metodología de este trabajo) que las integrales de energía $E_{50\%}$, $E_{80\%}$, etc. varían más suavemente que el E_1 o E_2 a lo largo de los transectos, y esta es una buena propiedad para las campañas realizadas en áreas pequeñas. La variabilidad no aleatoria de las variables $E_{\%}$ es conservada en el análisis de PCA donde se observan pesos mayores para las variables $E_{70\%}^1$, $E_{50\%}^1$ y $E_{50\%}^2$ en la frecuencia de 38 kHz y $E_{80\%}^1$ y $E_{70\%}^1$ en la de 200 kHz en el primer componente. Esto significa que estas variables están correlacionadas. La inclusión de la pendiente en su totalidad en el segundo componente principal significa que esta no se correlaciona con las variables de energía. Esto se ilustra además en la figura 3.8 donde se puede observar que la clasificación está casi completamente explicada por el primer componente del PCA.

En la clasificación obtenida utilizando estas variables energéticas y la pendiente, los fondos rocosos de los acantilados de la costa se detectan claramente. El fango y la arena gruesa de las clases están tan cerca espacialmente que aparecen parcialmente superpuestas en la clasificación. La arena gruesa aparece en puntos aislados, como también se observó en los transectos de buceo, donde la longitud media de los segmentos con arena gruesa fue de 29,3 m (con una

longitud total de 58,6 m; por comparación, los segmentos de arena fina tuvieron una longitud media de 110 m y una longitud total de 1835 m).

Es importante señalar que las clases obtenidas estadísticamente no se correlacionan con la profundidad. Por ejemplo, la arena fina se encuentra en todo el rango de profundidades. El fango se encuentran en las zonas menos profundas del sureste (confirmado por los buceadores) y en el sur-oeste de la zona de estudio (cerca de la playa Villarrube, no confirmado por los buceadores). También aparece en una región más profunda (~ 30 m) cerca de la salida de la ría, rodeada de rocas y arena fina, una formación común en otras Rías Gallegas (Vilas *et al.*, 2005).

El grado de correlación (0,91) y el coeficiente *kappa* ($\kappa = 0,81$) obtenidos con la clasificación de *pings* promediados (y corregidos con PLP) son comparables con otros trabajos publicados, estos valores superan por ejemplo a los obtenidos por Moyer *et al.* (2005) y Schimel *et al.* (2010) (este último para la comparación entre métodos). En ambos casos la estructura de fondo era más homogénea que la de este trabajo, con los cambios de fondo observados a la misma distancia de la costa (Moyer *et al.*, 2005). Si tenemos en cuenta sólo 3 clases, fango/arena fina, arena gruesa y roca, el coeficiente de *kappa* aumenta ligeramente ($\kappa = 0,87$, 94 % de precisión). En este caso no se diferencia entre la arena fina y el fango, de forma similar a las clasificaciones obtenidas por otros autores (como Reid y Maravelias, 2001), que observan en algunos casos dificultades para la discriminación granulometría (Brouwer, 2008).

Cuando se comparan los resultados obtenidos a partir de la malla de variables interpoladas con el mapa de los pescadores (figura 3.9), el acierto cualitativo es bueno, aunque los límites de los tipos de fondo no son precisos. Sin embargo, existen desacuerdos en algunas regiones. Por ejemplo, en la boca de la playa de Villarrube (al sur oeste de la zona de estudio) la clasificación acústica sugiere la presencia de fango mientras que los pescadores señalan la presencia de arena. Como no se realizaron transectos de buceo en esta zona, no es posible saber cual es el tipo de fondo real. La división del fondo rocoso en las subclases reproduce también las clases observadas en el mapa de pescadores. Sin embargo, la falta de un mayor número de datos de buceo no nos permite evaluar el acierto de esta subclasificación (estas subclases no se han incluido en la validación a pesar de que se representan en el mapa temático en la figura 3.7). El desajuste de los límites de las clase entre ambos mapas puede ser debido a una sobreestimación de las distancias más cerca de la costa por los pescadores, un sesgo perceptivo conocido (Woods *et al.*, 2009).

3.6. Conclusión

En este trabajo hemos introducido el método de corrección de PLP, que permite comparar fácilmente los *pings* medidos a diferentes profundidades. Este método es una generalización de la corrección de energía habitual (*time adjustment* y *power adjustment*) adaptada para reproducir los cambios en la forma de los *pings* causados por la longitud del pulso emitido. Se ha mostrado cómo funciona este método, corrigiendo el efecto de la longitud del pulso en los *pings* ya compensados para el tiempo y energía. Esta corrección permite también definir variables de integración de energía (E_1 y E_2) más adecuadas para la clasificación por ser más estables entre *pings* consecutivos. El presentado aquí es un método de “corrección con pérdidas” que permite mejorar la clasificación (la comparabilidad de los eco) a costa de perder alguna información que, no obstante, sería inútil para una clasificación global (con *pings* de diferentes profundidades).

A modo de ejemplo, se ha obtenido una clasificación no supervisada de 4 clases (fango, arena fina, arena gruesa y rocas) de un área de estudio, la Ría de Cedeira, basada en las variables extraídas de los *pings* acústicos con corrección PLP. La clasificación muestra una alta significación estadística con respecto a los datos de campo ($\kappa = 0,81$, con una precisión del 90%). La cartografía de hábitats bentónicos obtenida es espacialmente coherentes con los datos conocidos de la zona de estudio, y más precisa en sus límites. El resultado es notable en una zona con grandes cambios relativos en la batimetría (de 5 m a 35 m) y con cambios rápidos de fondo (en distancias muy pequeñas).

Para permitir la reproducibilidad del método, se utilizó un programa en Octave, el análisis estadístico se realizó con el paquete estadístico R, y la información geográfica se analizó con gvSIG, todos ellos software libre.



Uso de un sonar de barrido lateral dirigido verticalmente para la cartografía de fanerógamas marinas

Dentro del proyecto “Implementación de nuevas tecnologías mediante la aplicación al sector medioambiental de metodologías avanzadas con sensores hiperespectrales. Caracterización de praderas de fanerógamas marinas” desarrollado por EGMASA, se abordó la evaluación de metodologías de teledetección para la cartografía de la *Posidonia oceanica* en el Mediterráneo. Junto con diferentes técnicas de imagen se evaluó la capacidad de las sondas monohaz y los Sidescan Sonar (SSS). Para intentar mejorar los resultados obtenidos por estas metodologías acústicas, se realizaron medidas con el Sidescan Sonar orientado verticalmente aprovechando la máxima insonificación del fondo.

En este trabajo se presenta una nueva forma de utilizar un SSS para estudiar la ubicación de praderas de fanerógamas o bosques de algas. La disminución de los costes de adquisición de los SSS, y de los costes derivados de su uso, convierte a esta herramienta en una alternativa de bajo coste a otros sensores acústicos más especializados y a los métodos directos.

Este trabajo se desarrolló en colaboración con dos miembros del grupo de investigación de Recursos Marinos y Pesquerías: Elena Couñago y Sara Aceña.

Ha sido enviado para su publicación a la revista *Estuarine Coastal and Shelf Science*, con el título: “Using vertical Sidescan Sonar as a tool for seagrass cartography”.

4.1. Introducción

La importancia biológica de las fanerógamas marinas en los mares de todo el mundo ha sido ampliamente estudiada. Las praderas de fanerógamas son ecosistemas muy productivos de gran importancia ecológica y económica (véanse Pollard, 1984; Heck y Valentine, 2006). En el Mar Mediterráneo, la fanerógama más abundante es la *Posidonia oceanica* (Den Hartog, 1970; Diaz-Almela *et al.*, 2007; Belzunce *et al.*, 2005; Lipkin *et al.*, 2003), que se desarrolla en extensas praderas submarinas que juegan un papel fundamental y diverso en el metabolismo del sistema nerítico, no solo en cuanto a proporcionar alimentos, cobijo y zonas de reproducción para especies de interés económico, sino también en cuanto al mantenimiento de equilibrios abióticos como la sedimentación o la concentración de gases y de nutrientes disueltos (Colantoni *et al.*, 1982).

Sin embargo, en las últimas décadas la *Posidonia oceanica* ha experimentado un declive generalizado en todo el Mar Mediterráneo (Benedito *et al.*, 1990; Sánchez-Lizaso *et al.*, 1990; Marbá *et al.*, 1996; Ardizzone *et al.*, 2006; Boudouresque *et al.*, 2006). El aumento de la contaminación, el deterioro de la costa, el anclaje de los barcos, el arrastre de fondos o el cambio climático, entre otros, están causando el retroceso de estas praderas (Diaz-Almela *et al.*, 2007; Peirano *et al.*, 2005), poniendo en peligro la supervivencia de muchos ecosistemas.

Debido al importante papel de las praderas submarinas en el entorno marino y a su valor como bioindicadores (Colantoni *et al.*, 1982; Komatsu *et al.*, 2003; Descamp *et al.*, 2005), es importante evaluar su distribución espacial y la biomasa y composición de las especies presentes en ellas. En este sentido, se han desarrollado distintos métodos directos e indirectos para evaluar el estado ecológico de las praderas de fanerógamas, y de *P. oceanica* en particular (Giraud, 1977; Ott y Maurer, 1977; Fresi y Saggiomo, 1981; Meinesz *et al.*, 1981; Belsher *et al.*, 1988; Buia *et al.*, 1992; Marbá *et al.*, 1996; Marcos-Diego *et al.*, 2000; Boudouresque *et al.*, 2000; Pasqualini *et al.*, 2001; Di Maida *et al.*, 2011; por citar algunos).

Las técnicas de muestreo directo proporcionan datos precisos y localizados, pero conllevan mucho tiempo y esfuerzo, y proporcionan poca información sobre la distribución espacial debido a su escasa cobertura horizontal. Los métodos de teledetección óptica han sido en muchos trabajos una solución eficiente para cartografiar las fanerógamas marinas en la zona intermareal, sin embargo, en zonas sumergidas estas técnicas están limitadas por la claridad del agua, así como por la cobertura de nubes y la rugosidad de la superficie del mar (Vis

et al., 2003), y esto suele llevar a una subestimación de la extensión del área ocupada por las fanerógamas (McCarthy y Sabol, 2000).

Las técnicas de hidroacústica activa han demostrado su capacidad para detectar las fanerógamas marinas: La diferencia de impedancias entre el agua y la vegetación acuática, debida a la densidad de los tejidos (que es diferente de la del medio que los rodea) y a la presencia de huecos en el tejido y de burbujas de agua a su alrededor (Wilson y Dunton, 2009), produce una respuesta de retrodispersión (*backscattering*) más intensa que la procedente de la columna de agua lo que permite la localización de las estructuras vegetales sobre el fondo. Además, las técnicas acústicas son suficientemente baratas y la toma de datos suficientemente rápida y sencilla para convertirse en herramientas de monitorización que permiten hacer coberturas sinópticas de áreas extensas. Por estas razones, han sido utilizadas para detectar y caracterizar la vegetación acuática en aguas dulces (Maceina y Shireman, 1980; Maceina *et al.*, 1984; Duarte, 1987; Thomas *et al.*, 1990) y en el mar (Spratt, 1989; Miner, 1993; Bozzano *et al.*, 1998; Carbó y Molero, 1997; Sabol *et al.*, 2002; Sabol y Burczinski, 1998; Tegowski *et al.*, 2003; Paul *et al.*, 2011; Di Maida *et al.*, 2011).

Los sistemas acústicos monohaz han sido ampliamente utilizados para cartografiar hábitats bentónicos (Brouwer, 2008; Orłowski, 2009; Serpetti *et al.*, 2011; entre otros), incluyendo trabajos específicos orientados a la detección y cartografiado de algas (Komatsu *et al.*, 2007; Minami *et al.*, 2010) y fanerógamas (Tegowski *et al.*, 2003; Valley *et al.*, 2005; Sabol *et al.*, 2002). La mayoría de estos trabajos informan de buenos resultados en cuanto al cartografiado, aunque con precisiones que varían cuantitativamente, dependiendo de la variedad de tipos de fondos en el área de estudio, de su topografía, de los tipos de vegetación subacuática, etc. En el caso concreto del cartografiado de fanerógamas, al estar basado en la respuesta acústica de las hojas, su capacidad de detección es muy dependiente de la actividad fotosintética diurna (Wilson y Dunton, 2009), del rango de profundidades, y de la densidad de hojas integrada dentro de la huella acústica de la ecosonda monohaz (Tseng, 2009). Además, por las características de las sondas monohaz, estando el muestreo basado en transectos, es necesario interpolar espacialmente los resultados.

A diferencia de las anteriores (monohaz), las ecosondas multihaz pueden adquirir datos acústicos sobre la totalidad del fondo, evitando así la necesidad de interpolarlos y mejorando, notablemente, la resolución espacial. Sin embargo, al estar también fundamentadas en la energía retrodispersada, sufren de las mismas limitaciones debidas al rango de profundidades y a la densidad de hojas

que las monohaz. Además de esto, el uso de las sondas multihaz aumenta ostensiblemente los costes del estudio, requiere una calibración y un procesamiento de los datos acústicos complejo (y por lo tanto mayor preparación específica de los técnicos), y no siempre se encuentran disponibles los valores de retrodispersión de la columna de agua necesarios para la correcta calibración de los datos (Anderson *et al.*, 2008; Di Maida *et al.*, 2011; Heyman *et al.*, 2007).

Cuvelier (1976) propuso usar el sónar de barrido lateral (*Sidescan Sonar*, SSS) como un método rápido y fiable para cartografiar los fondos de *P. oceanica* y monitorizar su evolución; de hecho, el SSS ofrece tanto la visión general deseable como el detalle necesario, acompañándolos de una gran versatilidad y costes de operación relativamente bajos (Colantoni *et al.*, 1982). A pesar de que algunos autores se han cuestionado recientemente la eficiencia del SSS para distinguir tipos de cubiertas de fondos marinos (Van Rein *et al.*, 2011), otros alaban sus ventajas como una técnica que permite la rápida obtención de mapas que caracterizan el grado de deterioro o de recuperación de las praderas de *Posidonia sp.* o de *Cymodocea sp.* (Siljeström *et al.*, 1996; Pasqualini *et al.*, 1998). Sin embargo, una desventaja de los datos de SSS es que suelen ser analizados mediante técnicas de interpretación de imágenes (a menudo visuales) de modo que los resultados han sido criticados por subjetivos (Anderson *et al.*, 2008).

Una aproximación distinta a la cartografía de la vegetación subacuática considera las diferencias en la geometría de la vegetación. Sabol *et al.* (2002) utilizaron una ecosonda monohaz (con 7 cm de resolución vertical) para discriminar tres tipos diferentes de especies de fanerógamas, con éxito moderado. Más recientemente, medidas de altura de alta resolución (entre 1,5 y 4,7 cm) proporcionadas por un sónar de imagen de sedimentos (Sediment Imaging Sonar, SIS), han permitido clasificar especies con buenos resultados (Paul *et al.*, 2011), aunque en una cubierta espacial muy limitada y en zonas en las que era sabida la existencia de una única especie (el trabajo se centra en la determinación del área cubierta por varias fanerógamas marinas).

El objetivo de este artículo es presentar y validar un método acústico de cartografía de praderas de *Posidonia oceanica* a partir de su distribución de alturas, usando una variación del sónar de barrido lateral (SSS) adecuada para la detección de la vegetación y la medición de las longitudes de los tallos, así como para la obtención de la batimetría. También se evaluará su capacidad para diferenciar y cartografiar especies coexistentes.

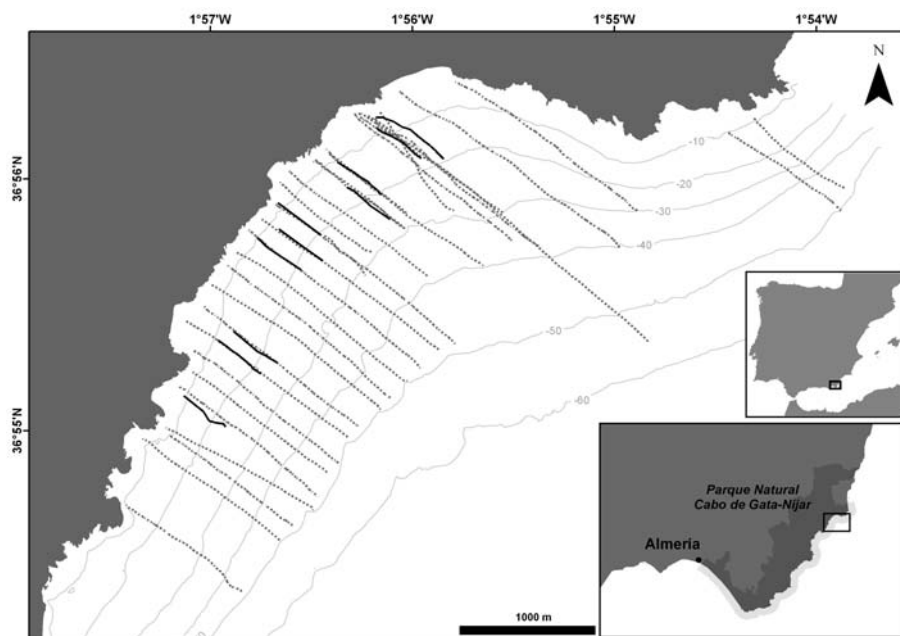


Figura 4.1: Área de estudio con los transectos acústicos (líneas punteadas) y de buceo (líneas continuas) en Cabo de Gata (SE de España).

4.2. Material y métodos

Área de estudio

El área de estudio fue la bahía de Agua Amarga, en el Parque Natural de Cabo de Gata, situado en el sureste de la costa mediterránea de España (figura 4.1). Esta zona es una bahía abierta, orientada al SE, con una superficie de 15 km², cubierta por una fina capa de depósitos de conglomerados y arenas calcáreas (hasta 5 m de espesor) por encima de la roca caliza (Martín *et al.*, 1996).

La *P. oceanica* se encuentra ampliamente distribuida en esta zona, situada aproximadamente entre 5 y 25 m de profundidad, con una alta tasa neta anual de reclutamiento de brotes, una de las más elevadas del Mediterráneo español (Mar-

bá *et al.*, 1996). La *P. oceanica* presenta haces de unas 5 a 10 hojas de 5 a 12 mm de ancho y una longitud habitual de entre 20 y 40 cm, aunque puede ser de hasta 1 m (Borum y Greve, 2004).

Otra de las especies marinas usualmente asociadas con praderas de *P. oceanica* es la *C. nodosa*, que se distribuye a lo largo de los límites de las praderas de *P. oceanica*. La *C. nodosa* tiene haces que contienen entre 2 a 5 hojas de 2 a 4 mm de ancho y de 10 a 45 cm de largo. En esta zonas también están presentes otras especies de fanerógamas marinas como la *Zostera noltii* y algunas especies de macroalgas (IUCN, 2010).

Funcionamiento del Sidescan Sonar

El Sidescan Sonar (SSS) es un transductor monohaz con un ángulo transversal ancho y un ángulo longitudinal muy estrecho. Este tipo de transductores trabajan generalmente a altas frecuencias, entre 100 y 1000 kHz, y se instalan en remolques que se sumergen para evitar cualquier tipo de perturbación de la embarcación. El SSS funciona como un dispositivo de imagen acústica que proporciona imágenes de alta resolución de amplias áreas del fondo del mar. Gracias a la orientación transversal oblicua y a su haz de estrecha apertura angular longitudinal y a las altas frecuencias, permite a los usuarios estudiar las características texturales del fondo del mar, siendo por lo tanto ideal para la detección de objetos. Sin embargo, las imágenes de los SSS no están generalmente dotadas de información batimétrica (Kenny *et al.*, 2003) si no se utilizan SSS interferométricos (Stewart *et al.*, 1994). Además, los software de postprocesado de las imagenes de SSS dependen en gran medida de las interpretaciones visuales subjetivas de las texturas, en oposición a un tratamiento numérico y objetivo de la imagen y de las clasificaciones realizadas con sondas monohaz y multihaz (Anderson *et al.*, 2008).

En este trabajo, se utiliza un transductor SSS con una sonda EA400P (Simrad, Noruega). El transductor se colocó en la parte externa del casco de la embarcación (la forma habitual de trabajo de las sondas monohaz y multihaz). La frecuencia utilizada fue de 200 kHz, lo que permitió utilizar *pings* con duraciones de pulso de 256 μ s conservando una razón señal/ruido adecuada (pulsos más cortos tienen mejor resolución vertical teórica pero el ruido los hace poco aprovechables). La tasa de pings fue ajustada al máximo (aproximadamente 1,4 ping/s en la zona de estudio). El ángulo del haz del transductor tenía un ancho de 49° y una apertura longitudinal de 0,5° (ver figura 4.2). Su orientación,

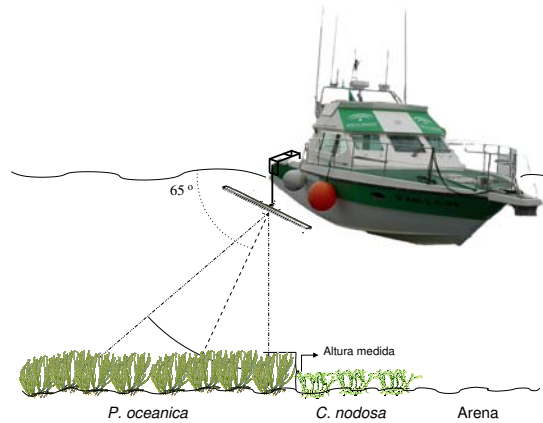


Figura 4.2: Medida de alturas de fondos arenosos y praderas de fanerógamas con un sidescan sonar con orientación vertical (SSSv).

generalmente horizontal, se cambió a una orientación cuasi-vertical, permitiendo así aprovechar la configuración angular del haz, para medir profundidades y alturas de las estructuras por encima del fondo. De esta manera, el SSS con orientación vertical (SSSv), funciona como una ecosonda monohaz vertical, pero con algunas ventajas derivadas de sus ángulos de apertura que le aportan la capacidad para detectar cualquier estructura emergente por encima del fondo del mar.

Dado que la *Posidonia oceanica* se distribuye en praderas o en manchas (*patches*) sobre el fondo arenoso, el uso de un SSSv aumenta la probabilidad de insonificación de este tipo de praderas antes de que el frente de onda llegue al fondo. Como el objetivo del método presentado será la caracterización estadística de las alturas de la vegetación, será muy importante evitar que los *pings* incidan sin insonificar ninguna planta. Por lo tanto, la insonificación del área de estudio por un haz con el ángulo longitudinal estrecho y el ángulo transversal ancho, proporcionará una detección de la altura de las praderas estadísticamente más significativa, en comparación con la obtenida por una sonda monohaz de haz estrecho (como el SIS). Por otra parte, la alta frecuencia de trabajo y la duración de los pings utilizados nos permite obtener una alta resolución vertical (4,8 cm), minimizando los procesos de difracción, y mejorando la detección de praderas de fanerógamas y la medición de su altura.

Trabajo de campo

Campaña acústica

La campaña acústica se llevó a cabo los días 3 y 4 de noviembre de 2007. Aunque normalmente la *P. oceanica* sufre una disminución de su altura en torno a estos meses (Sánchez-Lizaso, 1993), las observaciones previas en el área de estudio, por parte de los autores y de los pescadores de la zona (entre otros) notificaron la presencia de praderas en estas fechas, presentando solamente pequeñas variaciones interanuales.

Para la realización de la campaña se utilizó un buque oceanográfico pequeño (12 m de largo). Toda la campaña se realizó con buenas condiciones meteorológicas (es decir, con movimientos de balanceo y cabeceo del barco despreciables). La velocidad de la embarcación se mantuvo en torno a 4 nudos y el transductor se situó aproximadamente a 0,5 m por debajo de la superficie del agua.

La figura 4.1 resume la campaña que consistió en 30 transectos, casi perpendiculares a la línea de costa, descritos entre las líneas batimétricas de 5 y 50 m de profundidad, cubriendo una longitud total de 48 km en una zona de 9,5 km². La distancia entre transectos contiguos fue de entre 150 y 200 m. Las posiciones se registraron en la ecosonda utilizando un GPS GN33 de Simrad.

Transectos de buceo

Con el fin de obtener datos para validar los resultados acústicos, se llevaron a cabo 10 transectos de buceo en el área de estudio, dos en noviembre de 2007, poco después de la campaña acústica, y 8 transectos en febrero y abril de 2009, con la intención de completar los datos adquiridos previamente. Para definir la localización de los transectos de buceo se realizó antes un análisis exploratorio de los ecogramas obtenidos con el SSSv, para detectar las áreas con mayor variabilidad en cuanto al tipo de fondo. De este modo se realizaron los transectos de buceos en zonas de alta variabilidad de estructuras observadas sobre el fondo, aproximadamente paralelos a los transectos acústicos, haciéndolos coincidir con el centro del haz acústico.

Los 10 transectos de buceo realizados tuvieron una longitud de 400 m (figura 4.1). La distancia promedio entre estos transectos de buceo y los acústicos

Parametro	Opciones
Tipo de fondo	Arena Grava
Especies	<i>P. oceanica</i> <i>C. nodosa</i> Macroalgas
Distribucion	Ausencia Praderas <i>Patches</i>
Estado de las fanerógamas	Densa Dispersas
Altura de la vegetación	(en cm)

Tabla 4.1: Definición de la clasificación utilizada para describir las variables observadas en los vídeos submarinos y por los buceadores.

fue de 21 m (comparable a los 6 m utilizados por Paul *et al.* (2011) en aguas poco profundas, de 8 m). A partir del inicio de cada transecto, el barco lanzó una cuerda plomada, con marcas cada 5 m, hasta llegar al punto final del transecto. Los buceadores recorrieron la cuerda anotando todos los cambios observados en el fondo, atendiendo a la presencia, distribución, estado relativo (evaluado visualmente) y altura (medida con un metro) de la *P. oceanica* (ver tabla 4.1).

Como los movimientos del barco y las corrientes pueden modificar la trayectoria de la cuerda a medida que es lanzada desde la embarcación, para intentar corregir estas desviaciones, los buceadores tiraban de una boya de seguridad cada vez que marcaban un punto en el fondo. La embarcación entonces se aproximaba a la boya y recogía la localización con un GPS (de forma similar a lo realizado por Pasqualini *et al.*, 2000).

Todos los transectos de buceo se registraron además con una cámara de vídeo submarina de alta resolución (HDR-HC1E, Sony), equipada con un sistema de iluminación consistente en dos brazos flexibles con una luz de 50 Watts cada uno. Los buceadores mantuvieron la videocámara a unos 40 cm por encima del fondo, manteniendo en la escena la cuerda y un área representativa del fondo circundante (ver fotogramas en la figura 4.4).

Análisis de los datos

Datos acústicos. Generalmente, la vegetación sumergida produce una fuerte e inmediata retrodispersión (*backscattering*) justo por encima del fondo, a una altura que depende de la altura del dosel de la vegetación (Sabol *et al.*, 2002). Debido a esto, un análisis de los primeros centímetros del ecograma sobre el fondo permite estudiar la presencia, características, cobertura y altura de las praderas marinas de fanerógamas (Lefebvre *et al.*, 2009; Paul *et al.*, 2011; Thomas *et al.*, 1990).

En este trabajo los datos acústicos adquiridos por la sonda fueron guardados en archivos RAW (uno por cada transecto) que contienen la intensidad del *backscattering* para cada *ping*. Estos archivos RAW también almacenan la información del GPS (Simrad GN33) en formato NMEA. Para cada *ping*, se leyeron los valores de las muestras digitales (*bins*) y se descartaron los *bins* correspondientes a los primeros 2 metros por debajo del transductor, ya que solo contienen información de reverberación acústica en el campo cercano. De entre el resto de *bins*, se localizó aquel con mayor valor de intensidad en cada *ping* (correspondiente con la máxima reflexión desde el fondo) y se determinó el inicio de la señal del fondo como el primer *bin* (en dirección a la superficie) 30 dB inferior al máximo. Este umbral y la orientación vertical del haz del transductor aseguran una identificación correcta del fondo, a partir de la cual se localiza la vegetación.

Una vez que se detecta el fondo, se mide el nivel de ruido de la columna de agua para cada *ping*. En este trabajo se consideró que la vegetación iba a estar contenida siempre en el primer metro por encima del fondo. Para cada *ping* se calcula como ruido el valor medio de los *bins* situados entre 1 y 2 m por encima del fondo en los 20 *pings* vecinos (10 previos y 10 posteriores). El valor calculado del ruido de la columna de agua se utiliza para discriminar la vegetación. Cuando en un *ping* una señal dentro de la franja de vegetación supera apreciablemente la intensidad de ruido de la columna de agua (en 10 dB), se considera vegetación. Dado que el ruido en la columna de agua presenta diferencias significativas, el uso de un umbral fijo no es adecuado para la identificación de la vegetación (Paul *et al.*, 2011). En este caso, el umbral de 10 dB fue determinado a partir de la inspección visual de los ecogramas alineados. La altura de la vegetación medida para cada *ping* fue georreferenciada y guardada en formato ASCII para ser importada en un SIG. La figura 4.3 ilustra los pasos de este algoritmo.

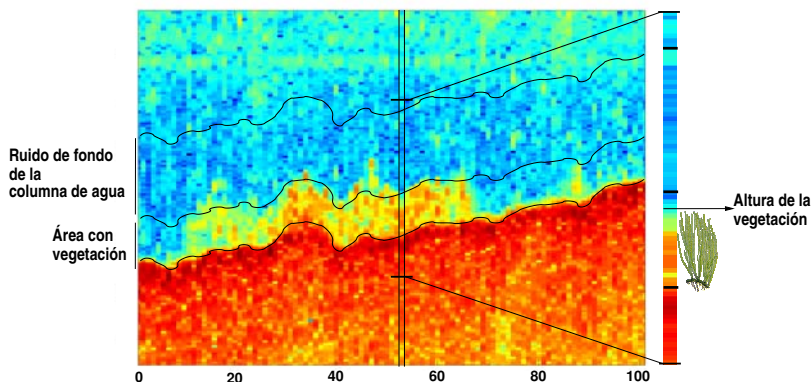


Figura 4.3: Esquema del cálculo de las alturas de la vegetación en un ecograma. El ruido de la columna de agua es calculado en el área situada entre 1 y 2 m por encima del fondo. Se ilustra la determinación del cálculo de alturas de vegetación entre (entre 0 – 1 m por encima del fondo) para un ping (derecha).

Dado que todo el procesamiento de datos se describe en términos de comparación de niveles de intensidad, no fue necesario realizar correcciones de potencia (*time adjustment*, *power adjustment*). Además, como el transductor se orientó verticalmente, y el primer rebote fue casi de una trayectoria vertical, no fue necesario corregir la altura ni la posición geoméricamente.

Los algoritmos anteriores se han implementado en un software libre escrito en Octave (*Ecosons seagrass*) disponible para su descarga¹.

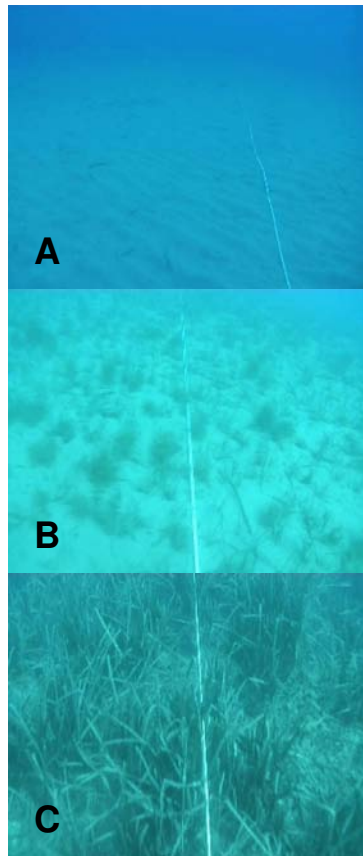
Procesamiento de los datos de buceo. Las trayectorias de los transectos de buceo fueron corregidas a partir de las localizaciones GPS de la boya de seguridad grabadas durante los transectos. Las grabaciones de vídeo fueron reproducidas y cada cambio de fondo observado fue registrado haciendo referencia a la longitud del transecto utilizando las marcas visibles de la cuerda (cada 5 m). La caracterización de los fondos se hizo siguiendo la clasificación de la tabla 4.1, con el fin de compararla con las observaciones obtenidas por los buceadores.

¹<http://www.recursosmarinos.net/download/SSSV>

Las notas tomadas por los buceadores y la caracterización obtenida con la visualización de los vídeos fueron cargadas en una base de datos de un SIG y asociadas a las trayectorias de los transectos. Los datos obtenidos por los buceadores fueron utilizados para la validación de los resultados acústicos, una vez que se comprobó que coincidían con las observaciones de los vídeos (es decir, que ambas fuentes de datos corresponden al mismo tipo de fondo, asegurando que no se produjeron errores de transcripción). Para simplificar la clasificación acústica de la zona de estudio las diferentes combinaciones de tipos de fondo (tabla 4.1) fueron reducidas a tres tipos principales (figura 4.4) y otro tipo llamado "otros". Por ejemplo, el fondo de arena con grupos aislados de *P. oceanica* densa se consideró como *P. oceanica* ya que las altas alturas observadas encajaban mejor dentro de esta clase.

Sistemas de Información Geográfica, SIG. Se utilizó un procedimiento de estadística en SIG para obtener un mapa temático de la zona de estudio. Los softwares utilizados fueron ArcGis (ESRI) y el paquete estadístico R. El proceso incluyó tres pasos: cálculo de los histogramas de altura de cada uno de los tipos de fondo (*end-members* de la clasificación), cálculo e interpolación de las funciones de máxima verosimilitud, ML (usando los histogramas), y la selección del tipo de fondo más probable.

Para calcular los histogramas de altura, las alturas calculadas para cada uno de los *pings* acústicos fueron introducidas en una base de datos junto con el tipo de fondo correspondiente (a partir de la identificación de los buceadores). Esta correspondencia fue obtenida asociando cada *ping* del SSSv con el tipo de fondo definido en el punto más cercano de los transectos de buceo. Dado que los datos acústicos y los transectos de buceo no fueron coincidentes exactamente en el espacio, fue necesario establecer una distancia máxima por encima de la cual no se relacionarían las dos fuentes de datos. Este radio, r_{op} se determinó como aquel que proporciona los mejores resultados de la validación para el proceso de clasificación (Scardi *et al.*, 2006), en nuestro caso 50 m. Los *pings* que no contasen con datos de buceo a esta distancia (o menor) no fueron considerados en el cálculo de los histogramas. Los histogramas de frecuencias de alturas se calcularon (utilizando el paquete estadístico R) para cada tipo de fondo, tomando como ancho del intervalo el ancho del *bin* (4,8 cm). Estos histogramas (normalizados) proporcionan las distribuciones empíricas de probabilidad de alturas para cada uno de los tipos de fondo.



*Figura 4.4: Tipos de fondos clasificados de acuerdo a la presencia y estructura de praderas de *P. oceanica*. A) fondo arenoso, B) *C. nodosa*, y C) praderas de *P. oceanica* densa.*

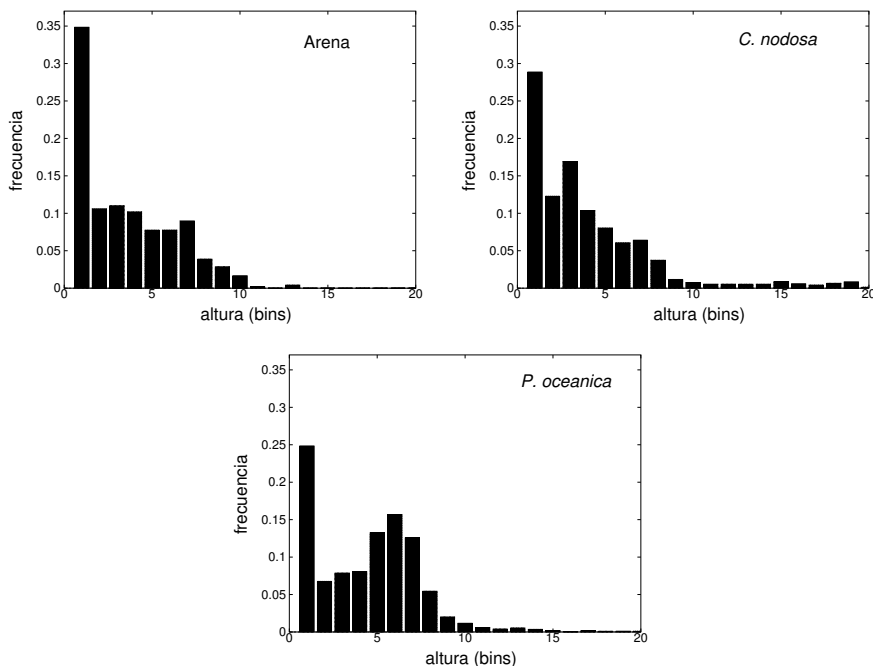


Figura 4.5: Histogramas de frecuencias de altura normalizados, correspondientes con los pings situados a menos de 50 m de un transecto acústico, agrupados en tres clases (arena, *C. nodosa* y *P. oceanica*) y utilizados para la clasificación de ML en tres clases.

Los histogramas utilizados para la clasificación se muestran en la figura 4.5. Se realizaron simulaciones de Monte Carlo para valorar la calidad de los histogramas a la hora de distinguir entre tipos de fondo. Estas simulaciones mostraron que en nuestro caso las muestras aleatorias extraídas de estos histogramas serían clasificadas con un error inferior al 5% utilizando el método de ML siempre que se tomaran 100 muestras, lo que corresponde (a la velocidad a la que se navegó) a unos 35 m (por lo tanto 50 m está por encima de este límite).

Se llevaron a cabo tres clasificaciones diferentes, a partir de los principales tipos de fondo (*P. oceanica*, *C. nodosa* y fondos de arena), en orden creciente de complejidad:

- i) Praderas de *P. oceanica* y fondos de no-*P. oceanica* (que incluyen praderas de *C. nodosa* y fondos de arena).
- ii) Praderas de *P. oceanica*, praderas de *C. nodosa* y fondos de arena.
- iii) Praderas homogéneas de *P. oceanica*, praderas homogéneas de *C. nodosa*, fondos mixtos (fondos clasificados como *P. oceanica* intercaladas con *patches* de *C. nodosa* y vice versa) y fondos arenosos.

Alrededor de cada *ping* se puede estimar el tipo de fondo utilizando el enfoque de máxima verosimilitud (ML), donde el “parámetro” a maximizar es el tipo de fondo del *ping* (y el histograma de su entorno). Para cada clase de fondo marino puede calcularse el logaritmo de la verosimilitud de las alturas observadas alrededor de cada *ping* como el promedio del logaritmo de las frecuencias de las alturas (determinadas a partir del histograma de alturas) medidos a una distancia del *ping* menor o igual a r_{op} . Esto difiere ligeramente de una simple suma, habitual en la inferencia estadística, pero no afecta al resultado. De este modo, a cada *ping* se le asignó el tipo de fondo que proporciona el nivel más alto de log-verosimilitud.

Para superar las limitaciones del muestreo por transectos y de la desigual densidad de *pings*, fue necesario aplicar un proceso de interpolación espacial. Esta interpolación calcula la media necesaria para el proceso de ML descrito. Se probaron dos métodos de interpolación: estadística por vecindario (filtro de media) y el *kriging* ordinario. Los algoritmos de estadísticas por vecindarios calcularon en cada punto del mapa la media aritmética de los valores de log-verosimilitud dentro de un entorno de ese punto (definido por el radio r_{op} en los transectos acústicos, pero mayor fuera de ellos). El algoritmo de *kriging* ordinario calculó en cada punto del mapa una estimación de la media con el menor error de varianza, proporcionando así un estimador estable (es decir, con la menor dependencia de la varianza de la distribución de puntos) de la media logarítmica de la verosimilitud. Este método tienen la ventaja de que también permite extender la inferencia por extrapolación fuera de los transectos, es decir, permite obtener el mapa temático del área. En ambos métodos se estableció un radio de búsqueda máximo de 150 m. Además para el algoritmo de *kriging* el número máximo de vecinos utilizados fue de 140, más o menos equivalente a 50 m a lo largo de los transectos.

Para validar los mapas temáticos obtenidos se generaron matrices de confusión utilizando los transectos de buceo. Se establecieron puntos cada metro dentro

		P	NP				P	C	S					P	M	C	S
Media	<i>P. oceanica</i>	75	25	72	0	28	32	15	0	53							
	<i>C. nodosa</i>	24	76	22	0	78	3	54	0	43							
	Sand	64	36	49	0	51	10	22	0	67							
		Ac=72 %			Ac=62 %			Ac=34 %									
Kriging ordinario	<i>P. oceanica</i>	68	32	63	0	37	34	15	11	40							
	<i>C. nodosa</i>	58	42	48	0	52	17	31	29	23							
	Sand	61	39	53	0	47	8	27	20	45							
		Ac=63 %			Ac=54 %			Ac=32 %									

Tabla 4.2: Matrices de error de los dos métodos de interpolación para diferente número de clases (*P*: *P. oceanica*, *NP*: no-*P. oceanica*, *C*: *C. nodosa*, *S*: arena, *M*: zona mixta con *P. oceanica* y *C. nodosa*). Los valores de error y precisión (*Ac*) se dan en porcentajes de los puntos de verificación en los transectos de buceo.

de los transectos de buceo y los tipos de fondo observados por los buceadores fueron comparados con las superficies temáticas obtenidas.

4.3. Resultados y Discusión

Con la aplicación de la metodología explicada a los datos acústicos de SSSv del área de estudio se han obtenido dos mapas temáticos que muestran los resultados de la clasificación en dos clases: *P. oceanica* y no-*P. oceanica* (ver figura 4.6). Ambos mapas, obtenidos utilizando dos métodos de interpolación diferente, presentan el mismo patrón de distribución de *P. oceanica* en el área de estudio. Sin embargo, la precisión de la validación (es decir, el número de puntos de buceo de *P. oceanica* y no-*P. oceanica* que se localizan en las zonas del mapa correctamente clasificados como tales, dividido por el número total de puntos de buceo considerados), muestra un nivel de acuerdo ligeramente superior en el mapa obtenido con filtro de media que en el generado por *kriging* ordinario (tabla 4.2).

Observando el mapa obtenido con el filtro de media, en la totalidad del área estudiada, la cobertura estimada de las praderas de *P. oceanica* fue de 152 ha, en su mayoría concentrada en una estrecha franja paralela a la costa en el centro de la bahía de Agua Amarga. Las dos mitades de esta franja se encuentran aproximadamente entre los 10 – 20 m de profundidad en el sur, y 5 – 20 m en el

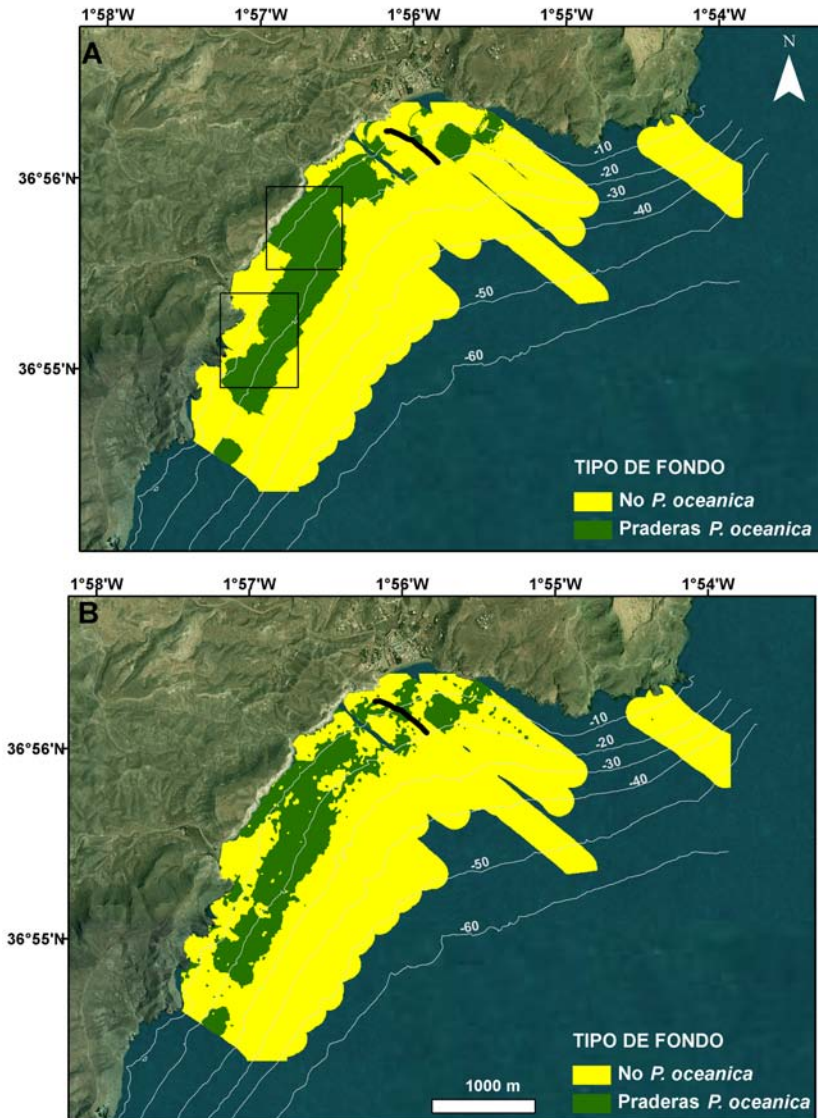


Figura 4.6: Clasificación de la zona de estudio. Se muestran los resultados de los dos métodos de interpolación: (A) filtro de media, (B) kriging ordinario. Las áreas dentro de los cuadros se muestran en la figura 4.7 comparadas con la clasificación de los transectos de buceo. El transecto de buceo destacado se utiliza en la figura 4.8 para ilustrar la correspondencia entre el perfil de altura y las observaciones de buceo.

norte. En la parte norte del área de estudio, cerca del pueblo de Agua Amarga (figura 4.6), no se ha clasificado *P. oceanica* cerca de la costa y sólo se observa una pequeña mancha (12 m^2) a 500 m de la playa principal de la ciudad. En la zona más al sur del área estudiada, se observa una mancha de *P. oceanica* ($4,8\text{ m}^2$) rodeada de una zona de no-*P. oceanica*.

No se cartografió *P. oceanica* por debajo de los 25 m de profundidad, de acuerdo con la distribución conocida de esta especie para la zona de estudio (con presencia de *P. oceanica* hasta 23 – 25 m), y con la información de buceo.

Los resultados son similares a los obtenidos y publicados por EGMASA (2009) y Méndez *et al.* (2012). Estos estudios se realizaron con una imagen aérea CASI y con imágenes de satélite (CHRIS Proba). Los límites de las praderas de *P. oceanica* cartografiados en estos trabajos se ajustan aproximadamente a los límites obtenidos aquí (dentro del área de estudio, las imágenes de satélite comprenden un área más grande). Las diferencias espaciales observadas son menores que el radio de interpolación utilizado (que determina la resolución espacial de nuestro método).

El mapa temático obtenido por clasificación *kriging*-ML (figura 4.6B) presenta mayores irregularidades en los límites de los tipos de fondo que el obtenido con el filtro de media. Sin embargo, el primero reproduce algunas de las estructuras observadas en la cartografía de EGMASA (2009), que se suavizan en el de media.

Cuando se compara con los transectos de buceo, la clasificación obtenida es acorde en 8 de los 10 transectos. En la figura 4.7 se muestran transectos en los que algunos segmentos fueron erróneamente clasificados. En los mapas obtenidos con el filtro de media (A y B), los transectos de buceo homogéneos con *P. oceanica* fueron bien clasificados (A), sin embargo, pequeñas áreas de arena observadas por los buceadores dentro de praderas de *P. oceanica* fueron clasificadas como *P. oceanica* (A, B), debido al pequeño tamaño de estas áreas y al efecto de generalización del filtro de media. En el caso de los mapas obtenidos con *kriging* algunas de estas pequeñas áreas arenosas fueron correctamente clasificadas (D), sin embargo, también se generaron manchas de arena, en praderas de *P. oceanica*, que no habían sido observadas por los buceadores (C, D). Ambos efectos se explican porque este método de interpolación no suaviza las superficies generadas tanto como el filtro de media.

La precisión de la clasificación de dos clases (validada con respecto a los datos de buceo) fue de 0,72. Por lo tanto, su exactitud está por encima del límite del 60 % de precisión de una discriminación de orden bajo aceptada por Riegl

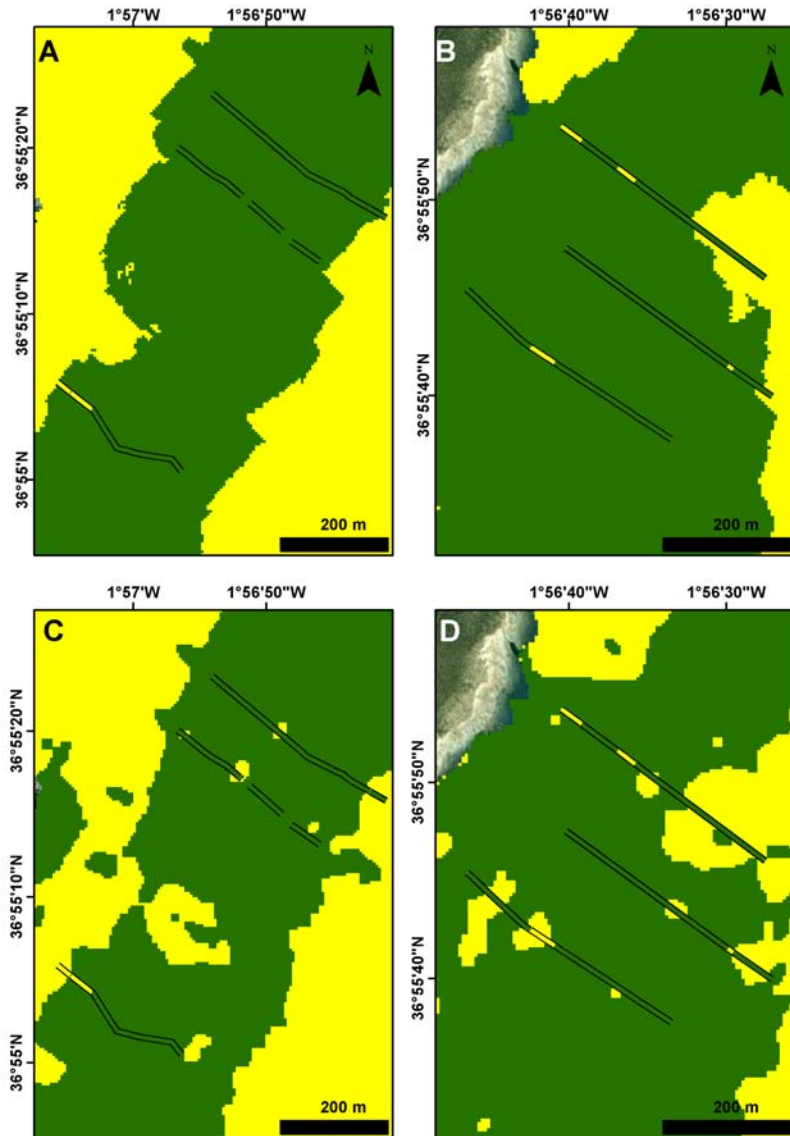


Figura 4.7: Detalle de la clasificación de dos clases (cuadros en la figura 4.6) que muestra las diferencias entre las observaciones de los buceos y los resultados de las interpolaciones utilizando filtro de media (A y B) y kriging ordinario (C y D). Los transectos de buceo aparecen sobre los mapas con la misma codificación de colores.

et al. (2005). Sólo por comparar ambos resultados, un cálculo similar utilizando el mapa de EGMASA (2009), proporciona una precisión de 0,73 en una clasificación similar de dos clases.

En la clasificación de tres categorías, se intentó dividir la clase no-*P. oceanica* en arena y *C. nodosa*. La clase *P. oceanica* apenas muestra cambios con respecto a la clasificación anterior (de dos clases). *C. nodosa* aparece en pequeñas manchas (*patches*) cerca de la *P. oceanica* en la parte norte del área de estudio. Ninguno de estos *patches* coincide con transectos de buceo, pero su presencia es posible dado que estas formaciones sí se dan en transectos cercanos. Esto coincide también con EGMASA (2009); Méndez *et al.* (2012) que encuentran *patches* de *C. nodosa* en esta área. Otras áreas de *C. nodosa* se cartografiaron por debajo de 35 m de profundidad, en áreas donde no se pudieron realizar transectos de buceo. En otros trabajos se ha observado *C. nodosa* hasta 40 m de profundidad (no en esta zona) Borum y Greve (2004), aunque en este caso es más probable que la distribución de las alturas anómalas se deba a artes de pesca de fondo localizadas en estos lugares.

En la clasificación de cuatro clases, la distribución de *C. nodosa* se mantiene. Las praderas de *P. oceanica* se dividen en dos (*P. oceanica* y fondos mixtos), pero su distribución no se corresponde con la información de los buceadores. Aún así sí se observa que la mayoría de los fondos mixtos aparecen en zonas donde los buceadores observaron una alta dispersión en las alturas de las plantas de *P. oceanica*. En todos los casos, los errores de clasificación aparecen en la arena y en *patches* de *C. nodosa* y *P. oceanica* (entre 2 – 51 m y 1 – 30 m respectivamente, a lo largo de los transectos de buceo), pequeños comparados con los radios de búsqueda e interpolación utilizados en los diferentes pasos del proceso de clasificación. Por ejemplo, los grupos aislados de *P. oceánica* densa en fondos de arena no se identifican como un tipo diferente, ya que sus alturas son una mezcla de dos tipos diferentes de fondo (*P. oceanica* densa y arena). Esto se puede comprobar reduciendo el radio de interpolación a 100 m, por ejemplo; en este caso aparecen nuevos límites y *patches* de *C. nodosa*, lo que demuestra que los errores de clasificación de *C. nodosa* son causados por la mezcla entre clases. Esto puede observarse también en la figura 4.8, donde se muestra el perfil de alturas de un transecto de buceo (estimada a partir del transecto acústico más cercano), con picos de altura que aparecen donde los buceadores observaron grupos aislados de *P. oceánica* densa.

En nuestro estudio, pasó un año entre la campaña acústica y algunos de los transectos de buceo. Este desfase podría afectar a la longitud de las hojas de *P. oceanica* y de *C. nodosa*, sin embargo sólo se utilizó la distribución espacial

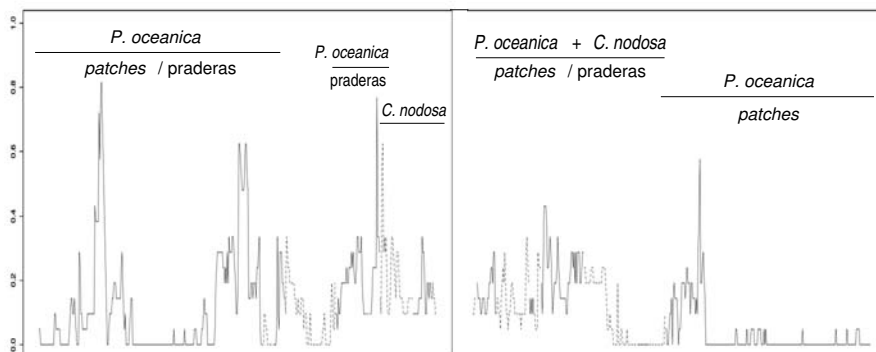


Figura 4.8: Perfil de alturas de un transecto de buceo (resaltado en la figura 4.6) calculadas utilizando el transecto acústico más cercano. Se muestran dos transectos acústicos, que recorren el transecto de buceo en ambas direcciones (el eje X representa el avance del buceador a lo largo del transecto). Los tipos de líneas corresponden a la información de los buceadores y las observaciones de vídeo (sólida, *P. oceanica*, y discontinua, *C. nodosa*). Los picos de altura aislados corresponden a los patches de vegetación.

observada por los buceadores (que se supone prácticamente constante a lo largo del año; Marbà *et al.*, 2004) para asignar a cada clase de vegetación una altura (determinada a partir de datos acústicos obtenidos en el mismo período), por lo que el efecto de este desfase debe ser insignificante.

Sin embargo el método tiene dos limitaciones: una física y una estadística. La limitación física es común a todos los métodos acústicos: las variaciones estacionales de la altura de las hojas puede afectar a los histogramas de las clases, siendo los histogramas más diferentes los que obtienen mejores clasificaciones. Por ejemplo, si el estudio se hubiera realizado en primavera, las hojas serían más largas y tendrían una firma acústica más clara, debido a una mayor actividad fotosintética; entonces aparecerían claramente diferenciadas de la arena y de otras especies. En otras estaciones las clasificaciones serán más difíciles y se obtendrán peores resultados. En este sentido, y dado que el muestreo en este trabajo se realizó en noviembre, sus resultados no explotan al máximo las posibilidades del método presentado.

La limitación estadística está relacionada con la topografía del área de estudio y la distribución de las praderas de fanerógamas. Dado que las fanerógamas marinas se localizan cerca de la costa y se extienden más allá del límite de profundidad de trabajo de los buceadores, el área de toma de datos de campo para validación (*grountruthing*) está cubierta principalmente por *P. oceanica* y arena (es decir, estas clases concentran la mayor parte de los datos de buceo). Los *patches* de *C. nodosa* son muy pequeños y esto, junto con la no coincidencia de los transectos de buceo y transectos acústicos, implica correspondencias erróneas en los datos de entrenamiento (con los que se define el histograma de alturas de cada clase). Esta limitación podría resolverse incluyendo en la metodología la utilización de dispositivos de muestreo como los ROV (*Remote Observation Vehicles*) que pueden proporcionar datos, similares a los de los buceadores, a altas profundidades.

Observando los resultados de la clasificación de dos clases, el método de interpolación con el que se obtuvo una mayor precisión fue el de filtro de media. Esta ventaja frente al método de *kriging* ordinario podría estar motivada por la localización de los transectos de buceo, situados en un área mayoritariamente cubierta por *P. oceanica*, lo que beneficia a un método de interpolación con tendencia a la generalización como el filtro de media.

Ambos algoritmos tienen ventajas y limitaciones, y es difícil valorar cuál de las dos clasificaciones es mejor. La elección debe tener en cuenta los objetivos de la investigación. Por ejemplo, en la figura 4.7, algunos de los *patches* de arena señalados por la clasificación *kriging* se encuentran cerca de transectos de buceo y puede, en efecto, que correspondan a *patches* de arena reales dentro de la pradera (pero situados en una posición diferente a la del buceo). Por lo tanto, una cartografía general aprovecharía las características de suavizado del filtro de media, mientras que para la identificación de *patches* sería preferible utilizar la clasificación por *kriging* ordinario.

Los métodos de cartografiado de praderas de fanerógamas marinas, no sólo los acústicos sino también los métodos ópticos de detección remota, se han dirigido a evaluar la presencia de praderas, donde nuestro método funciona. Estos métodos se basan en la detección de *patches* y praderas, y rara vez detectan plantas individuales (Paul *et al.*, 2011). El método presentado en este trabajo es esencialmente estadístico y, por lo tanto, requiere de la existencia de una "población" homogénea alrededor de cada punto para que este sea correctamente clasificado. Sin embargo, al tratarse de una clasificación supervisada, la densidad de esta población determinará el número de muestras que se necesita tomar (para discriminar entre esa población y la arena del fondo), y por lo

tanto, de ella dependerá la resolución espacial del mapa resultante. La calidad de las poblaciones evaluadas (lo más importante durante los buceos) es, por tanto, un condicionante del método.

El método combina varias características positivas de otros métodos anteriormente publicados: se basa en el perfil de altura de la vegetación submarina (Lefebvre *et al.*, 2009; Paul *et al.*, 2011), utiliza la distribución estadística (Di Maida *et al.*, 2011), y utiliza un transductor sencillo y accesible, SSS (Pasqualini *et al.*, 2000; Sabol *et al.*, 2002; Piazzzi *et al.*, 2000). El enfoque estadístico de ML utilizado con un SIG es una característica nueva y muy eficiente para producir un mapa temático. La resolución espacial puede ser un problema si el objetivo del estudio es detectar regresiones de las praderas de muy pequeña escala, para su seguimiento. En esos casos, podría ser necesario utilizar un estudio acústico multihaz o el uso de clasificación de imágenes hiperespectrales. Sin embargo, para obtener un mapa de resolución media de las praderas de *P. oceanica*, el método presentado obtiene resultados suficientemente buenos para la bio-evaluación, y es más barato y más rápido (teniendo en cuenta el procesamiento de datos) que una campaña multihaz o que métodos basados en imágenes hiperespectrales.

4.4. Conclusiones

El método propuesto en este trabajo está basado en el tratamiento de los datos acústicos obtenidos en una campaña en la que se utilizó un SSS con el haz acústico dirigido hacia el nadir para proporcionar perfiles de alturas de vegetación sobre el fondo marino. La información necesaria para realizar un análisis estadístico de los perfiles de altura fue obtenida mediante transectos de buceo, diseñados para obtener datos de todas los tipos de fondo posibles (para lo que se seleccionaron las localizaciones de los transectos acústicos con mayor variabilidad). La clasificación se llevó a cabo utilizando un método de ML, que puede ser utilizado también en un SIG proporcionando mapa temáticos interpolados de la zona de estudio.

Teniendo en cuenta todas las consideraciones discutidas anteriormente, podemos concluir que el método propuesto es adecuado para obtener una cartografía básica de praderas de *Posidonia oceanica* en áreas extensas. Los resultados concuerdan bien (precisión de 0,72) con los datos obtenidos con los buceos, así como con otros resultados publicados obtenidos con metodologías más costosas y complejas (sensores ópticos aerotransportados). Este método es, por tanto,

CAPÍTULO 4. SONAR DE BARRIDO DIRIGIDO VERTICALMENTE
126 PARA CARTOGRAFÍA DE FANERÓGAMAS MARINAS

una alternativa eficiente para la monitorización a largo plazo de praderas de *P. oceanica*. Además, con un adecuada calibración con datos de buceo, podrían cartografiarse también las áreas con *C. nodosa*. Sin embargo, los resultados obtenidos en esta campaña no han sido suficientemente buenos como para situar estas especies , ya que las clasificaban incluso fuera de su intervalo natural de profundidad.



H. K. WILSON

Estimación de la densidad de bivalvos infaunales usando la información angular de una sonda de haz partido

Dentro de un proyecto de gestión de recursos marinos desarrollado por la empresa FISMARE Innovación para la Sostenibilidad S.L. junto con la Cofradía de Pescadores de Bueu, se evaluó la eficiencia de diferentes métodos para la cartografía de uno de los principales recursos de la cofradía: los bivalvos solénidos. Los resultados obtenidos por los métodos directos eran detallados, pero muy limitados en cobertura espacial y de difícil replicabilidad. Se testaron varios métodos acústicos para intentar cubrir esta necesidad, entre ellos, el uso de una sonda *splitbeam*.

Este trabajo representa el primer paso en el uso de la señal angular de transductores acústicos para la cartografía de bivalvos. Su futuro desarrollo podría convertirlo en el método estándar para el cartografiado y la gestión de los bancos explotados de bivalvos.

Su desarrollo se realizó en colaboración con Víctor Espinosa Roselló y Núria Zaragoza, del Departament de Física Aplicada de la Universitat Politècnica de València.

Este trabajo ha sido enviado para su publicación a la revista Fisheries Research, con el título: "Infaunal bivalve density assessed from split beam angular information".

5.1. Introducción

Como sucede con los stocks de peces, muchas especies de invertebrados, organismos bentónicos costeros con un precio alto por unidad y objeto de interés de las flotas artesanales, han sido sobreexplotadas en todo el mundo y, en algunos casos, agotadas (Jamieson, 1993; Jamieson y Campbell, 1998). Para evitar esta sobreexplotación, las estrategias de gestión sostenible se han hecho imprescindibles. En los últimos 10 años la mayor parte de estas estrategias de gestión han utilizado regulaciones espaciales, tales como rotaciones, áreas marinas protegidas (AMP), o derechos de uso territorial, que hacen imprescindible la cartografía de estos recursos naturales (Kostylev *et al.*, 2003; Schimel *et al.*, 2010; Adams *et al.*, 2010).

En general, las estrategias de gestión del medio costero han originado muchos esfuerzos de investigación para comprender, clasificar y proteger los hábitats marinos que se basan en una cartografía fiable de la distribución de las especies. Por otro lado, la cartografía exacta de la distribución de las especies comerciales puede reducir el esfuerzo de pesca y aumentar el rendimiento (Kostylev *et al.*, 2003). Sin embargo, no existe todavía una metodología que proporcione datos de abundancia de especies bentónicas de una forma precisa y económica (Grizzle *et al.*, 2005). Los métodos tradicionales (tales como el buceo, los *co-rers*, dragas, etc.) obtienen resultados de alta calidad pero tienen una cobertura limitada y son muy costosos, en términos de tiempo y dinero.

Los métodos acústicos son considerados como la herramienta más eficiente para el cartografiado y seguimiento de los hábitats bentónicos en grandes áreas (Anderson *et al.*, 2008). En particular, son una alternativa eficiente, de coste relativamente bajo, para el cartografiado de moluscos epibentónicos, que viven sobre el fondo (Allen *et al.*, 2005; DeAlteris, 1988; Grizzle *et al.*, 2005; Hutin *et al.*, 2005; JiangPing *et al.*, 2009; Lindenbaum *et al.*, 2008; Raineault *et al.*, 2011; Snellen *et al.*, 2008; Wildish *et al.*, 1998).

La respuesta acústica recibida desde el fondo marino está compuesta por la dispersión de la energía en la interfase rugosa agua-sedimento, causada por la diferencia de impedancia del sedimento con el agua, y por la dispersión del volumen de sedimento (situado bajo la superficie). La energía retrodispersada (*backscattering*) por la superficie depende principalmente de la pendiente, rugosidad y dureza de esta. El *backscattering* producido por el volumen depende

del tamaño de grano del sedimento, de la presencia/ausencia de restos de conchas o de especies infaunales y de la textura y porosidad del sedimento, lo que genera una señal acústica compleja que no tiene una relación sencilla con la estructura de los sedimentos (Anderson *et al.*, 2008; Diaz *et al.*, 2004). En general se asume que para ecosondas de alta frecuencia (es decir, $f \geq 100$ kHz) la energía retrodispersada por el fondo del mar es debida esencialmente al primer componente (interfaz agua-sedimento), debido a la alta atenuación de la onda dentro del sedimento. Sin embargo, cuando hay restos de conchas en el sedimento, su *backscattering* puede dominar la señal, por encima de la de la interfaz agua-sedimento, para frecuencias superiores a 60 kHz y ángulos de incidencia inferiores al ángulo crítico (Lyons, 2005).

La primera sonda de haz partido se comercializó en 1984, aprovechando las nuevas tecnologías electrónicas y los desarrollos en el procesamiento de la señal acústica (Foote *et al.*, 1984). Estas sondas detectan la diferencia de fase entre la señal recibida en diferentes partes del transductor (generalmente dividido en cuatro cuadrantes con respecto a los ejes babor-estribor y proa-popa), lo que permite la localización angular de un punto dispersor de energía acústica, calculada a partir de las diferencias de fase entre las ondas recibidas por diferentes partes del transductor. Estas diferencias son fácilmente relacionadas con los ángulos bajo los cuales el transductor ve al punto dispersor con respecto al eje del haz acústico (Bodholt *et al.*, 1989; Foote, 1986; Simmonds y MacLennan, 2005). Por ejemplo, los peces individuales pueden ser seguidos y, a través de su continua insonificación, puede ser calculada la dirección y velocidad de movimiento de un banco de peces (Peirson y Frear, 2003; Boswell *et al.*, 2007). Las ecosondas de haz partido proporcionan estas mediciones angulares incluso cuando los objetos dispersores son de gran tamaño, como el fondo del mar. En ese caso, la información angular se ha relacionado con las diferentes escalas de los perfiles de los fondos marinos (rugosidad) y ha sido utilizada para la generación de imágenes acústicas en 3D de fondos profundos (ver Cutter y Demer, 2010 y referencias citadas en él).

El objetivo de este trabajo es comprobar si la información angular proporcionada por una sonda de haz partido sobre el fondo marino en aguas poco profundas puede ser relacionada con la densidad de navajas (bivalvos solénidos). Con este objetivo, tres bancos de arena, con densidades diferentes, serán estudiados y clasificados estadísticamente utilizando funciones derivadas de la información angular. Dado que la respuesta acústica depende, en general, de las condiciones de adquisición y las propiedades granulométricas del sedimento, se llevará a cabo también un análisis alternativo basado en los valores de energía

acústica (*backscattering*), y otro analizando las condiciones de adquisición. Los resultados de ambos análisis serán utilizados para discutir el efecto de estas variables en los resultados obtenidos con los datos angulares.

5.2. Material y métodos

Área de estudio

Este estudio se realizó en la Ría de Pontevedra (Galicia, NW de España). Esta zona es explotada actualmente por 10 asociaciones de pescadores que extraen crustáceos y moluscos (bivalvos y cefalópodos). Las poblaciones de las especies de navaja presentes en esta área (*Ensis ensis*, *Ensis siliqua*, *Solen marginatus*) son cogestionadas por el gobierno regional y ocho asociaciones de pescadores a través de un plan específico de explotación de navajas (Consellería do Mar Xunta de Galicia, 2011).

A lo largo de esta ría hay 46 bancos de navaja ubicados a profundidades de entre 0 y 12 m y con un tamaño medio de $11,76 \times 10^4 \text{ m}^2$, de acuerdo con la cartografía de bivalvos solénidos existente (FISMARE, 2011). Tres de estos bancos, regularmente explotados por los pescadores, fueron considerados para este estudio: Raxó, Aguete, y A Cova (figura 5.1). Estos tres se encuentran en bancos de arena de entre 5 – 11 m de profundidad y cuentan con áreas aproximadas de 9,3, 6,7 y $28,3 \times 10^4 \text{ m}^2$, respectivamente. Atendiendo a la densidad de navaja observada por los pescadores, estos bancos fueron descritos cualitativamente como muy productivo (Raxó), productivo (Aguete), o no productivo (A Cova).

Estaciones de muestreo

Se establecieron seis estaciones de muestreo (dos estaciones por banco, ver figura 5.2). En cada estación se tomaron muestras de sedimentos con un corer de 30 cm. Además, se tomaron muestras de la comunidad biológica utilizando una bomba de succión con un tamaño de red de 1 cm. Las muestras de sedimentos se secaron en un horno a 80°C durante dos días y se dividieron utilizando un tamiz analítico de 1000 μm (Retsch, Düsseldorf, Alemania). Su distribución de tamaños se estimó con granulometría láser (LS200, Beckman Coulter Inc., Brea, CA, EE.UU.) y se clasificaron de acuerdo a la clasificación de Folk (Jackson

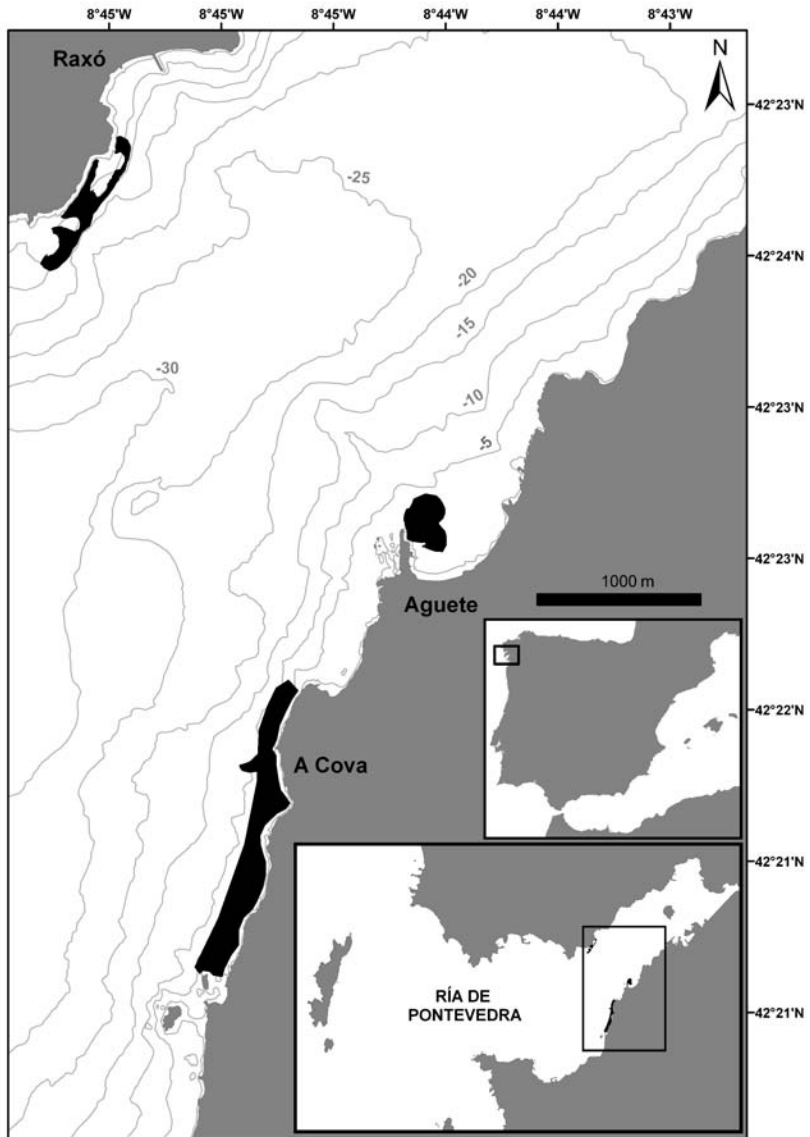


Figura 5.1: Área de estudio en la Ría de Pontevedra. Se muestran los bancos de navaja estudiados.

CAPÍTULO 5. SONDA DE HAZ PARTIDO PARA ESTIMAR LA DENSIDAD DE BIVALVOS INFAUNALES

134

Banco de navajas		Granulometría (clasificación de Folk)	Densidad de navajas (indiv./m ²)	Otros bivalvos infaunales (indiv./m ²)	Datos de pescadores
Raxó	1	Media-fina	Alta (124)	112	Muy productivo
	2	Media-gruesa	Alta (164)	16	
Aguete	3	Media-fina	Baja (60)	16	Productivo
	4	Media-gruesa	Media (116)	52	
A Cova	5	Gruesa	(0)	8	No productivo
	6	Media-gruesa	(0)	52	

Tabla 5.1: Datos obtenidos en las estaciones de muestreo e información aportada por los pescadores para los tres bancos de navajas.

y Richardson, 2007). Las navajas y otros bivalvos fueron contados en cada una de las estaciones de muestreo para validar la información obtenida de los pescadores. Esta información se resume en la tabla 5.1.

Campaña acústica

La campaña acústica se llevó a cabo el 12 de julio de 2009 (el mismo día que se tomaron las muestras de sedimento y comunidad biológica). Se utilizó una ecosonda científica Simrad EK60, con un transductor de haz partido ES200-7C que se ancló a la barandilla del casco de un pequeño barco de pesca (6,25 m de largo) con un dispositivo de acero en forma de pinza. El transductor de 200 kHz trabajó con la máxima potencia (1 kW), la mínima longitud de pulso (64 μ s) y una tasa de muestreo de 10 pings/s, para obtener las máximas resoluciones vertical y horizontal posibles. La campaña se realizó con buenas condiciones climáticas y la velocidad del barco se mantuvo entre 1,5 y 3,5 nudos. Esta velocidad y tasa de muestreo permiten insonificar (muestrear) cada punto del fondo como mínimo en 4 *pings* consecutivos (el ángulo del haz es de 7° y los

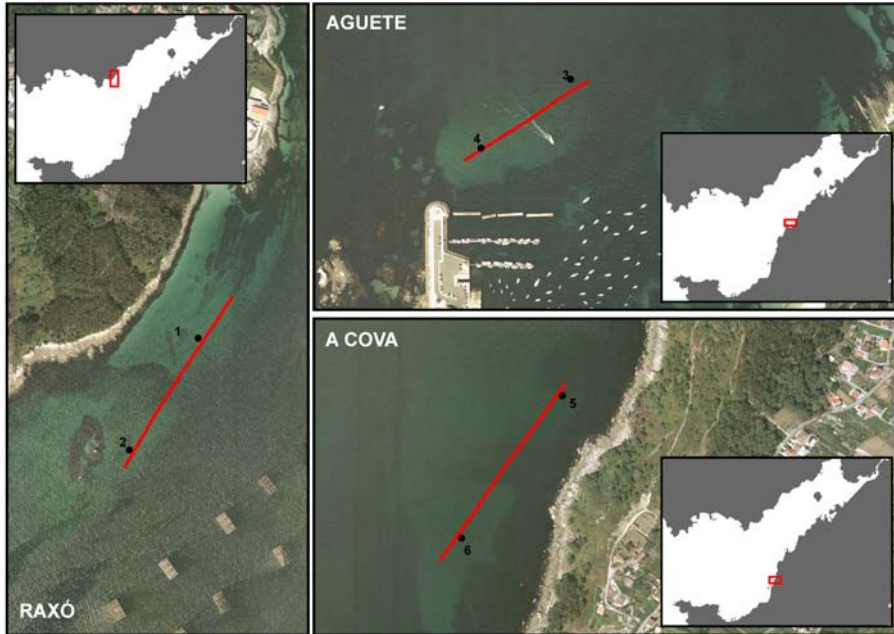


Figura 5.2: Transectos acústicos y puntos de buceo. De arriba a abajo: Raxó, Agnete y A Cova.

rangos de profundidad en la zona entre 5 – 11 m) garantizando la continuidad espacial. La localización de cada *ping* fue registrada en los archivos acústicos utilizando la señal de un GPS (Simrad GN33).

En cada banco se definió una línea paralela a la costa y se realizó el transecto un mínimo de 3 veces (véase la figura 5.2), cambiando el rumbo cada vez, es decir, dejando la costa a los lados izquierdo y derecho, para evaluar las diferencias derivadas del rumbo de la nave. En total, se realizaron 14 transectos: cinco a lo largo del banco de Raxó, cinco a lo largo de Agnete, y cuatro a lo largo de A Cova, con una longitud media de 550 m, 250 m, and 285 m, respectivamente.

Información angular del fondo La distribución de fase de la señal retrodispersada, y por lo tanto la información angular obtenida por la ecosonda de haz partido, se originan a partir de la topografía del fondo (rugosidad y pen-

diente dentro de la huella acústica) y las inhomogeneidades en la distribución de los dispersores situados en el sedimento (navajas en nuestro caso de estudio).

Anteriormente, la contribución de la topografía ha sido usada para discriminar las agregaciones de peces cerca del lecho marino, ya que se comportan como una superficie muy irregular (MacLennan *et al.*, 2004) y también para mejorar la resolución 3-D de la batimetría y la clasificación de los hábitats bentónicos (Demer *et al.*, 2009; Cutter y Demer, 2010), utilizando un grupo de transductores que operan en varias frecuencias para superar el problema de la decorrelación de la línea de base (pérdida de correlación entre la señal de distintas partes del frente de onda). Nuestra hipótesis es que dentro del sedimento, donde las fluctuaciones de impedancia se deben a la presencia de biomasa bentónica, variaciones locales de granulometría o composición de los fondos, deben producir un mecanismo similar. De este modo, la información angular del fondo nos aportará información sobre la presencia de grupos de navajas (ángulo ϕ en la figura 5.3a y ángulos proa-popa y babor-estribor en la figura 5.3b).

En el esquema idealizado de la figura 5.3c, los dispersores débiles (en comparación con la superficie del fondo) que cruzan el haz podría causar variaciones en la información angular de la ecosonda como lo harían dispersores móviles que pasan debajo del haz (peces). En una representación simplista, cuando la sonda de haz partido pasa sobre un dispersor único, el ángulo medido en dirección proa-popa (*alongship*) sufrirá una variación monótona (creciente desde valores negativos a valores positivos, pasando por el cero cuando se encuentre en el centro del haz), de valores positivos a valores negativos, mientras que el ángulo medido en dirección babor-estribor (*athwarthship*) mostrará un valor más uniforme. En el caso de un grupo de bivalvos, las dispersiones múltiples harán que los ángulos (determinados a partir de las diferencias de fase detectadas) se distribuyan alrededor de sus posiciones reales, aunque su evolución temporal será en promedio la que se acaba de describir. Sin embargo, siguiendo con el mismo ejemplo, su *backscattering* se hallará superpuesto al del resto del fondo, haciendo este grupo de bivalvos indistinguible en el ecograma energético. La información angular de estos bivalvos competirá con la procedente de la interfaz agua-sedimento y del sedimento, generando un patrón de ángulos muy complicado.

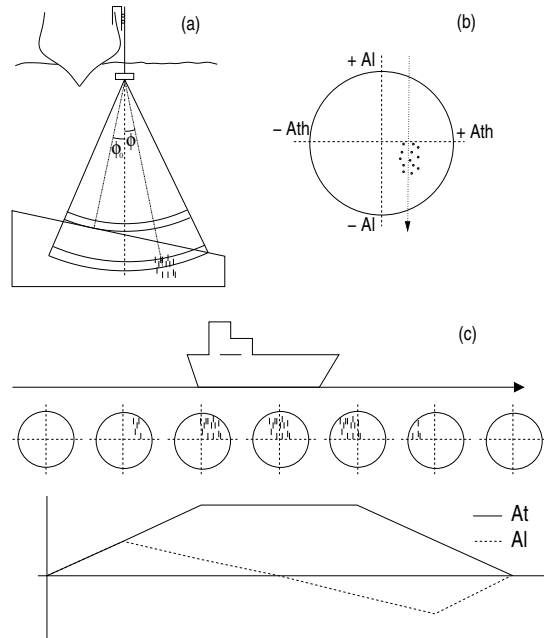


Figura 5.3: Geometría de adquisición (a) y esquema de ángulos (b) de la asignación de ángulos en la sonda para el caso de dispersores enterrados en un fondo sedimentario. Se representa también la evolución temporal esperada de los ángulos medidos cuando el transductor avanza (c).

Análisis de datos

Para estudiar la presencia de rastros de navajas enterradas en el sedimento en la información angular proporcionada por la ecosonda de haz partido, se aplicaron técnicas estadísticas basadas en la caracterización textural del ecograma.

La estadística de primer orden no ofrece información acerca de las variaciones en los ecogramas angulares que puedan relacionarse con la presencia de navajas. Por esta razón se realizaron análisis estadísticos de segundo orden destinados a detectar correlaciones entre datos acústicos cercanos. Concretamente, se realizó un análisis textural (Haralick *et al.*, 1973; Zaragoza *et al.*, 2010).

El análisis estadístico de segundo orden más utilizado es la matriz de co-ocurrencia, cuyos valores p_{ij} contienen la fracción de pares de datos acústicos

vecinos (*bins*) que han sido cuantificados con los niveles i y j respectivamente, en una ventana definida, y después de la cuantización de la señal en N niveles (Haralick *et al.*, 1973).

Los datos acústicos vecinos de un *bin* pueden ser definidos de dos formas: a lo largo de los *pings* (siendo vecinos los *bins* previo y posterior del *bin* en un mismo *ping*), o a lo largo de las profundidades (siendo vecinos los *bins* correspondientes a una misma profundidad de *pings* consecutivos, anterior y posterior). Nos referiremos como Tipo 1 a los vecinos definidos dentro de cada *ping* y como Tipo 2 a los definidos para cada profundidad (en diferentes *pings*). La matriz de co-ocurrencia resultante será simétrica, es decir, para calcular el valor de la fila i y la columna j , se contarán tanto los pares de *bins* (i, j) como los (j, i) .

Basándose en las matrices de co-ocurrencia, Haralick *et al.* (1973) presentaron las “características texturales”. Trece de estas características texturales (denotadas como H_1 a H_{13}) se han calculado tanto para los datos angulares *alongship* como para los *athwartship*. Junto con estas 13 variables se calculó otra característica textural, la lacunaridad (Lac), que describe la relación entre la desviación estándar y la media de los coeficientes de la matriz de co-ocurrencia. Estas variables se definen matemáticamente en el Apéndice de este capítulo.

En este trabajo se ha restringido el análisis textural a aquellos *bins* comprendidos entre la superficie del fondo y el equivalente a 30 cm de profundidad de sedimento, que coincide con la principal región insonificada del ecograma y también con la profundidad de los *corer* realizados. Se definieron 4 niveles de cuantificación para las medidas angulares normalizadas con la media y la desviación estándar del valor del ángulo a una profundidad dada bajo el fondo. Es decir, si el ángulo en un *bin* es ϕ , entonces se calcula un valor $\alpha = (\phi - \bar{\phi}) / \sigma_\phi$, siendo $\bar{\phi}$ el ángulo medio y σ_ϕ su desviación estándar en todos los *bins* ubicados a la misma profundidad que el *bin* considerado. Sólo aquellos ángulos situados dentro de dos desviaciones típicas alrededor de la media se han tenido en cuenta en los análisis, eliminando así valores extremos.

Los procesos de tratamiento de datos acústicos y cálculo de las variables de Haralick fueron implementados en software libre que está disponible para su descarga¹.

¹<http://www.recursosmarinos.net/download>

Clasificación acústica basada en los datos energéticos

Basándose en el *backscatter* del volumen del sedimento puede intentar obtenerse una clasificación de los datos acústicos utilizando los índices de rugosidad y dureza. Estos índices se calculan a partir del primer y segundo rebotes, respectivamente, y han sido ampliamente utilizados como variables para la clasificación de hábitats bentónicos (introducidos por Orłowski, 1984). La energía del primer eco (E_1) se calcula como la integral de la cola del primer eco, correspondiente a la reflexión difusa en la superficie (es decir, sin el aumento de energía inicial). La energía del segundo eco (E_2) se calcula como la integral de la señal completa del segundo rebote. Ambas energías son normalizadas con la profundidad aplicando la corrección $+20 \log(R)$, donde R es la profundidad. Este enfoque de dos variables fue introducido en el sistema comercial RoxAnn (Voulgaris y Collins, 1990).

Análisis estadístico multivariante Tanto a las variables de energía (E_1 y E_2) como a las variables de Haralick (*alongship* y *athwardship*), correspondientes a las texturas Tipo 1 y Tipo 2, se les aplicó el mismo método de estadística multivariante, muy común en otros estudios de clasificación de hábitats bentónicos (Legendre *et al.*, 2002; Morris y Ball, 2006): reducción dimensional, utilizando el Análisis de Componentes Principales (PCA), y análisis de conglomerados (*cluster*) jerárquico de los componentes seleccionados utilizando dendrogramas.

En primer lugar, los valores medidos fueron dispuestos en una matriz, con cada fila correspondiendo a una variable en una dirección dada (Tipo 1 o Tipo 2). Los valores de estas filas de la matriz se centraron (restando la media) y normalizaron (dividiendo por la desviación estándar). Sobre esta matriz se aplicó PCA obteniendo nuevas variables no correlacionadas (componentes independientes) y excluyendo del análisis las variaciones atribuibles al ruido. Sólo los componentes con autovalores mayores que 1 (regla de Kaiser) se utilizaron en el análisis de *cluster* posterior. El análisis *cluster* jerárquico se realizó utilizando distancias euclídeas y *linkage* completo para la generación de los dendrogramas. Todos estos análisis se realizaron con el paquete estadístico R.

Después de analizar los transectos completos, éstos fueron divididos en segmentos (mitades, cuartos y octavos de transecto) con un enfoque de dependencia de escala de arriba-abajo (*up-bottom*) para abordar el efecto de la distribución espacial de las propiedades del sustrato. Estas subdivisiones, aunque no proporcionan segmentos del mismo tamaño, son más representativas para estudiar

la transición entre las dos estaciones de cada banco, que se encuentran cerca de los límites de los transectos. Dado que a medida que disminuye la escala espacial hay un menor número de pings para analizar por segmento, subsiguientes divisiones de los datos proporcionarán resultados que muestren una significación estadística más débil y donde la dispersión de rasgos acústicos hará más difícil relacionar sus características con la presencia de conchas de navaja. Para tener en cuenta posibles variaciones debidas a la orientación de la embarcación con respecto a la costa, todos los análisis se realizaron dos veces manteniendo sólo los transectos o segmentos que dejan la costa a babor, en un caso, y a estribor, en el otro.

Los resultados obtenidos con el método acústico se compararon con los datos obtenidos con las muestras de granulometría y densidad de bivalvos, así como con la información aportada por los pescadores. La comparación se realizó geográficamente, haciendo coincidir los dos conjuntos de datos, utilizando el software GIS (ArcGis 10.0, ESRI).

5.3. Resultados

En los párrafos siguientes se describen los resultados obtenidos con el análisis de los transectos y de los segmentos generados con la división de cada transecto en cuatro partes. Se omiten los resultados de la división en dos segmentos por simplificar; la división de transectos en 8 segmentos empeora los resultados. Aunque se describen detalladamente todos los casos (Tipo 1, Tipo 2, *alongship*, *athwardship*, ...) sólo los más relevantes se representan en las figuras.

Características texturales Tipo 1

El análisis estadístico de todos los transectos, basado en las características texturales de Tipo 1, da como resultado un dendrograma que muestra tres ramas principales, una formada por dos transectos de Raxó y otras dos que se subdividen en dos sub-ramas, correspondiendo en ambos casos una sub-rama a Agüete y la otra a Raxó o A Cova.

Cuando el rumbo se tiene en cuenta (costa-babor o costa-estribor), la clasificación de los transectos se mantiene acorde al dendrograma general. En el dendrograma de transectos costa-babor, uno de los transectos de Raxó se encuentra clasificado junto con los de Agüete (el mismo que en el caso anterior se

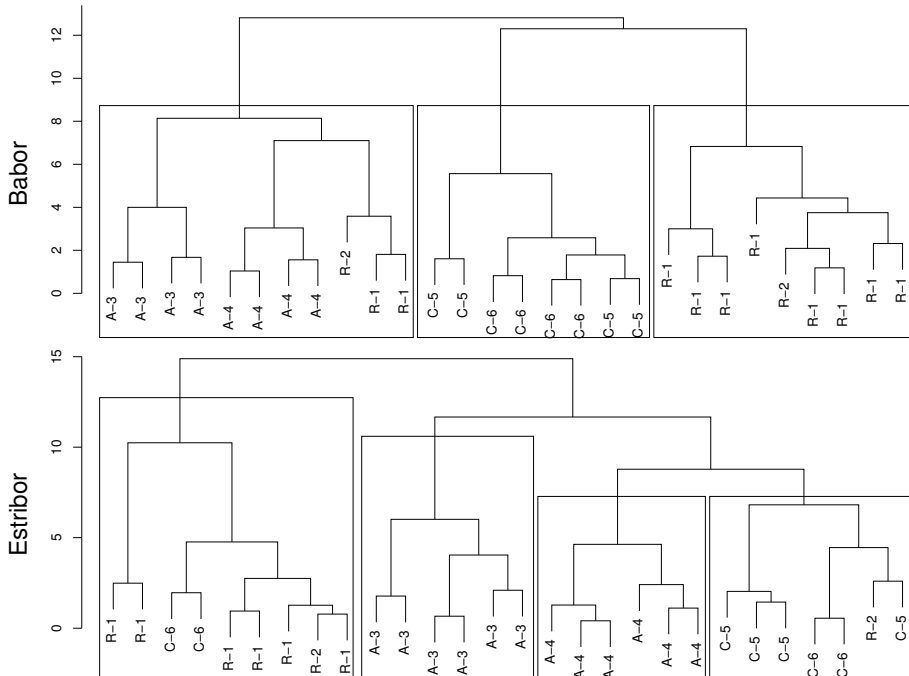


Figura 5.4: Dendrograma y clasificación de los segmentos basados en las características texturales Tipo 1 con rumbos divididos en (a) costa-babor y (b) costa-estribor. Cada extremo del dendrograma está etiquetado con la inicial del banco y el número de su punto de muestreo más cercano (según la tabla 5.1).

situaba en la rama mixta Agüete-Raxó). La de transectos costa-estribor agrupa correctamente cada transecto en la rama correspondiente a su banco.

El dendrograma de los segmentos de las características texturales Tipo 1 muestra cuatro ramas principales. Una corresponde a Raxó, una a Agüete, una a A Cova, y la cuarta se divide en cuatro sub-ramas, dos con segmentos de Agüete y las otras dos con segmentos de Raxó, una, y A Cova, la otra. Algunos de los grupos contienen segmentos incorrectamente clasificados (un total de cinco segmentos en el dendrograma completo, lo que representa un 17% de los segmentos).

Como sucedía en la clasificación por transectos cada uno de los grupos definidos

en las diferentes ramas del dendrograma de segmentos global son homogéneos con respecto al rumbo. Por lo tanto, el rumbo es una variable determinante en la clasificación y su efecto debe descontarse al estudiar el efecto de las otras variables (como la densidad de navajas o la granulometría) sobre la clasificación.

Cuando las características texturales de Tipo 1 de los segmentos de costa-babor son clasificadas por separado, aparecen tres ramas principales, cada una de las cuales contiene los segmentos de uno de los bancos (ver figura 5.4a). La rama de Agüete, sin embargo, contiene tres segmentos correspondientes a Raxó mal clasificados. En la clasificación de los segmentos costa-estribor dos de las cuatro ramas principales corresponden a Agüete y de las otras dos una a A Cova y otra a Raxó (con un total de 3 segmentos mal clasificados, véase la figura 5.4b).

El análisis de componentes principales mostró que las características texturales H_1 , H_5 , H_9 , H_{12} y Lac de la señal angular babor-estribor y H_1 , H_3 , H_5 , H_{10} de la señal proa-popa son las 10 variables más relevantes (las que tienen mayores pesos en los nuevos componentes, ponderadas con los valores propios de la matriz de covarianza) para la clasificación general, y están también entre las más relevantes de las clasificaciones teniendo en cuenta el rumbo.

Características texturales Tipo 2

El resultado del análisis de las características texturales de Tipo 2 de los transectos acústicos muestra cuatro ramas: dos pertenecientes a transectos de Agüete, otra a Raxó y otra a A Cova. Cuando se tiene en cuenta el rumbo, los resultados son los mismos que para las características texturales Tipo 1.

Cuando se analizan los segmentos (Tipo 2) se observan seis ramas principales. Uno de ellas corresponde a A Cova, dos de ellas a Raxó y las tres restantes de Agüete. Seis segmentos, todos ellos correspondientes a A Cova, se clasifican incorrectamente.

Como en el caso de las características texturales Tipo 1, se observa cierta dependencia del rumbo en la agrupación de los transectos, aunque de una forma menos evidente que en el caso anterior.

El análisis de los segmentos costa-babor mantiene todos los segmentos de Raxó en una de las tres ramas principales (figura 5.5a). Otra de las ramas está formada por segmentos de Agüete y la tercera está dividida en dos sub-ramas, una de A Cova y otra de Agüete. El dendrograma de los segmentos costa-estribor (figura 5.5b), agrupa los segmentos de Agüete en una de las dos ramas

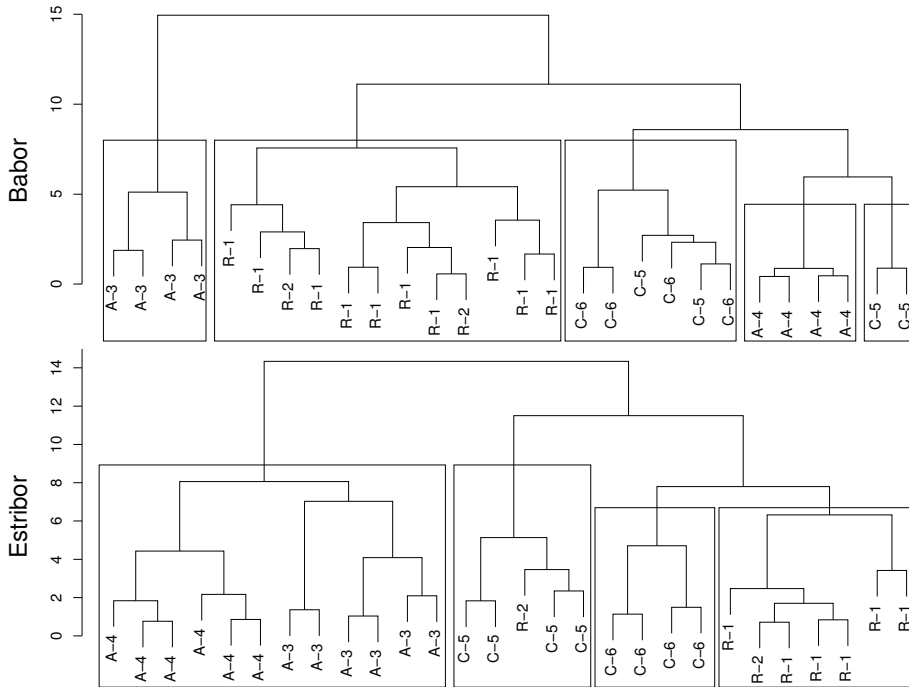


Figura 5.5: Dendrograma y clasificación de los segmentos basados en las características texturales Tipo 2 con rumbos divididos en (a) costa-babor y (b) costa-estribor. Cada extremo del dendrograma esta etiquetado con la inicial del banco y el número de su punto de muestreo más cercano (según la tabla 5.1).

principales. La otra rama se divide en dos, una solamente con segmentos de A Cova y otra subdividida en dos grandes sub-ramas, una de Raxó y la otra de A Cova. Únicamente un segmento fue clasificado incorrectamente.

El análisis de componentes principales mostró que las características texturales H_1 , H_2 , H_5 , H_8 , H_9 y Lac de la señal angular babor-estribor y H_9 y Lac de la señal proa-popa se encuentran entre las 10 variables más relevantes en la clasificación general, estando también entre las más relevantes en las clasificaciones por rumbo.

Clasificación basada en las variables de energía

Realizando el análisis de las variables E_1 y E_2 , todos los transectos de Raxó fueron agrupados en una de las dos ramas principales, sin embargo los transectos de Agüete y A Cova fueron mezclados en la otra. La división de los transectos en cuatro segmentos mantuvo los segmentos de Raxó en una de las dos ramas principales, pero en este caso muchos transectos de Agüete y A Cova fueron clasificados dentro de la rama de Raxó. Así, la clasificación no se conserva para los segmentos más pequeños. En la otra rama principal, los segmentos de Agüete y A Cova fueron agrupados en dos sub-ramas: una con los segmentos de Agüete (y dos de Raxó) y el otro mixto. Cuando se tiene en cuenta el rumbo el dendrograma apenas mejora.

5.4. Discusión

Los transectos de los tres bancos han sido clasificados utilizando las características texturales Tipo 1 (dentro de cada *ping*) y Tipo 2 (entre *pings*), y teniendo en cuenta el rumbo, dejando la costa a babor o a estribor. Todos los segmentos muestran características texturales lo suficientemente heterogéneas como para ser divididos en varias ramas en la mayoría de los análisis realizados. En particular, Agüete a menudo se divide en dos zonas diferenciadas: oriental y occidental. Los otros dos bancos, cuando se dividen en ramas separadas de los dendrogramas, no muestran esta segregación espacial. Todo ello concuerda con los datos de campo, atendiendo a la densidad de las navajas (véase el 5.1), que muestran que Raxó y A Cova tienen una distribución más uniforme que Agüete. Además de esto, la distribución de los segmentos comprendidos en las ramas mixtas, o la distancia entre ramas vecinas no pueden ser explicados solamente por los datos granulométricos o densidad de navajas.

El análisis de PCA ha mostrado que las variables texturales que contienen más información sobre la clasificación (que explican una mayor parte de la varianza) son el segundo momento angular (H_1), el contraste (H_2), la distancia media inversa (H_5), la entropía (H_9) y la lacunaridad (Lac). Con respecto a la información angular, los ángulos babor-estribor parecen contener una mayor variabilidad que los proa-popa, tal y como se explica en la figura 5.3.

No hay, a priori, ninguna razón para la asimetría entre los transectos costa-babor y costa-estribor observada en los dendrogramas generales (y respaldada por la mejor clasificación obtenida al tener en cuenta el rumbo). Tenemos

que concluir que es la orientación del transductor (que se sitúa siempre a babor) con respecto a la embarcación, que está afectado de algún modo por la posición del casco (que cambia con respecto a la costa). Esto es probablemente debido a la dirección de la onda retrodispersada con respecto al casco del barco.

Desde el punto de vista de la información contenida en la señal acústica, las características texturales Tipo 1 parecen ser las menos afectadas por las condiciones de adquisición, especialmente por la velocidad del barco y los movimientos de cabeceo y balanceo, ya que implican los pings individuales. Las características texturales Tipo 2 podrían capturar las variaciones provocadas por el avance del transductor de haz partido por encima de las heterogeneidades del fondo entre pings consecutivos.

En este sentido, respecto a las clasificaciones realizadas teniendo en cuenta el rumbo, el dendrograma obtenido con las características Tipo 1 proporciona una clasificación correcta de los segmentos (dendrograma costa-babor) y, cuando los segmentos de un banco son divididos en varios grupos (dendrograma costa-estribor), este banco es Agujete, que es el más heterogéneo según los datos recogidos mediante buceo. Las características texturales Tipo 2 requieren un número alto de clases para obtener una clasificación de segmentos correcta (dendrograma costa-babor) y también divide uno de los bancos homogéneos (A Cova) en dos subgrupos (dendrograma costa-estribor).

En cuanto a la clasificación basada en las variables de energía, los resultados muestran una correspondencia peor con la presencia de navajas que la clasificación angular. Tampoco se le puede atribuir la clasificación obtenida a una relación con la granulometría medida en las estaciones establecidas en los bancos de estudio (ver tabla 5.1).

Otra fuente de información que afectase a las clasificaciones podrían ser las condiciones de adquisición. La velocidad del barco se obtuvo de los datos de posición y tiempo del GPS. La magnitud de los movimientos de cabeceo y balanceo se dedujo a partir de las variaciones en la reflectancia acústica alrededor del máximo de insonificación (la sonda no estaba equipada con sensores de inclinación), donde se espera que ésta sea más grande, ya que el coeficiente de reflexión es gaussiano con una anchura dada por la rugosidad del fondo (Lurton, 2002). Aunque las variaciones de velocidad eran pequeñas y todo el estudio se llevó a cabo en buenas condiciones atmosféricas, los resultados obtenidos a partir del análisis de la velocidad y la variación de inclinación (que, a su vez, muestran un alto grado de correlación) separan el banco de Agujete de los otros.

La clasificación separada de Aguete en la clasificación angular (no mostrada en la clasificación basada en energía) podría estar influenciada por estas variables. De todos modos, aunque este resultado estuviese sesgado por las condiciones de medida, el hecho de que los bancos de Raxó y A Cova (no separados por las variables de ruido) sean correctamente clasificados con los datos angulares, descartan que esas variables de ruido sean responsables de la totalidad de las clasificaciones obtenidas y muestran la validez del método angular.

A pesar de su importancia económica, los trabajos dedicados a la cartografía de los bivalvos infaunales son muy escasos. Por lo tanto, vamos a comparar nuestro método con otros destinados a la detección y cartografía de especies de bivalvos comerciales situados sobre la superficie del fondo (Hutin *et al.*, 2005; Snellen *et al.*, 2008; Kostylev *et al.*, 2003). En estos trabajos se utilizan diferentes equipos acústicos (monohaz y multihaz) y se analiza la energía de la respuesta adquirida. Hutin *et al.* (2005) obtiene un 71 % de concordancia entre la clasificación acústica y los datos de campo en el cartografiado de áreas de almejas y Snellen *et al.* (2008) entre un 87 y un 98 %. Los resultados de la clasificación de segmentos obtenida en este trabajo (resolución espacial superior a 125 m), clasifican correctamente el 93 % de los segmentos de densidad de navaja. Kostylev *et al.* (2003) propuso una metodología basada en ecosonda multihaz que relaciona la fuerza de retrodispersión (*backscattering*) con la densidad de los bivalvos. Los autores concluyen que la retrodispersión podría (en base a un análisis de regresión) explicar un 52,4 % de la variabilidad en la abundancia de vieira comercial. Los autores sugieren utilizar esta correlación, junto con una estratificación del tipo de sedimento, para mejorar la evaluación de la densidad de vieira en áreas extensas. En nuestro caso, la granulometría observada en las estaciones de muestreo dentro de cada banco fue lo suficientemente diferentes como para descartar una relación entre la clasificación angular y la granulometría. Esto, junto con el diseño experimental de transectos eligiendo bancos de interés, es una ventaja con respecto a una cartografía basada en variables energéticas, que requiere tener en cuenta la variabilidad de las características geofísicas (Kostylev, in press).

A diferencia de los métodos anteriores para la cartografía de bivalvos (situados encima del fondo), la metodología presentada en este trabajo está más centrada en la gestión de bancos de bivalvos localizados y por lo tanto requiere de una campaña de medición más sencilla y, por lo tanto, barata. En este sentido, la información angular se revela como muy útil para la cartografía de poblaciones infaunales y podría permitir a los usuarios cartografiar periódicamente estos recursos, mejorando la información necesaria para su gestión.

5.5. Conclusiones

El método de clasificación presentado en este documento representa un primer intento de uso de una sonda de haz partido para la cartografía y el seguimiento de bancos de bivalvos infaunales (que se encuentran a decenas de centímetros en el interior del sedimento), como es el caso de las navajas.

Hemos demostrado que la información angular de la sonda de haz partido proporciona información relevante para la clasificación de áreas en base a la densidad de bivalvos. La clasificación ordena con éxito los transectos acústicos (o segmentos de los mismos) de acuerdo a la abundancia o no abundancia de navajas en ellos. No obstante, al tratarse de una clasificación no supervisada y relativa, el método es muy adecuado para el cartografiado de áreas, pero todavía es incapaz de proporcionar una medida estimada de la densidad de navajas. Esto representaría un paso posterior que requiere de una investigación sobre la respuesta acústica del fondo tal y como se ve por una ecosonda de haz partido.

El método propuesto será útil para la cartografía de poblaciones de bivalvos infaunales (como las navajas estudiadas) que se extienden a lo largo de áreas bentónicas y se caracterizan por una suave variación de su densidad. Esto es especialmente cierto en el contexto de los bancos de bivalvos explotados por pescadores. Para esta aplicación, el esquema de división de los transectos acústicos en fracciones parece adecuado. Por ejemplo, para el banco más grande (Raxó), donde los transectos tuvieron una longitud de unos 500 m, la división del transecto en 4 segmentos proporciona una resolución espacial de 125 m en el peor de los casos. Sin embargo, el método puede ser utilizado con segmentos más pequeños, teniendo en cuenta que cuanto menores sean los segmentos elegidos, menos estadísticamente significativa tenderá a ser la clasificación obtenida.

El método de información angular es, sin embargo, una mejora con respecto a los métodos basados en la intensidad de la reflexión que se han utilizado anteriormente para cartografiar agrupaciones de bivalvos de gran tamaño (*mollusk reefs*) situados sobre el sedimento. La metodología presentada aquí permite cartografiar la abundancia de bivalvos dispersos, o en pequeñas agrupaciones y enterrados en bancos de arena.

5.6. Anexo: Variables texturales de Haralick

Las variables texturales introducidas por Haralick *et al.* (1973) se definen en términos de los valores de las celdas de la matriz de co-ocurrencia, p_{ij} . Este conjunto de catorce medidas redundantes de probabilidad cuantifica la distancia de la matriz de co-ocurrencia a la de una señal espacialmente no correlacionada. Hemos mantenido el orden del artículo original: H_1 , la energía o segundo momento angular; H_2 , contraste; H_3 , correlación; H_4 , varianza; H_5 , momento de las diferencias inversas; H_6 , suma promedio; H_7 , varianza de la suma; H_8 , entropía de la suma; H_9 , entropía; H_{10} , varianza de la diferencia; H_{11} , entropía de la diferencia; H_{12} , entropía relativa normalizada; H_{13} , ángulo de la entropía y H_{14} , coeficiente de correlación máxima (no se utiliza en este artículo). Otra variable, la *lacunaridad*, describe la relación entre la desviación estandar de la matriz de co-ocurrencia y el valor medio de p_{ij} , mientras que todas las variables de Haralick tratan unicamente con una de ellas al mismo tiempo. Las expresiones matemáticas que se utilizan para calcular estas variables se resumen en la 5.2.

$$\begin{aligned}
H_1 &= \sum_{ij} p_{ij}^2 & H_8 &= \sum_k p_k^+ \log \frac{1}{p_k^+} \\
H_2 &= \sum_k k^2 p_k^- & H_9 &= \sum_{ij} p_{ij} \log \frac{1}{p_{ij}} \\
H_3 &= \frac{1}{s^2} \sum_{ij} (i-m)(j-m) p_{ij} & H_{10} &= \sum_k (k-n^-)^2 p_k^- \\
H_4 &= s^2 & H_{11} &= \sum_k p_k^- \log \frac{1}{p_k^-} \\
&= \sum_i (i-m)^2 p_{ix} \\
&= \sum_j (j-m)^2 p_{xj} \\
H_5 &= \sum_{ij} \frac{p_{ij}}{1+(i-j)} & H_{12} &= \frac{\sum_{ij} p_{ij} \log \frac{1}{p_{ij}} - \sum_{ij} p_{ij} \log \frac{1}{p_{ix} p_{xj}}}{\text{máx} \left\{ \sum_i p_{ix} \log \frac{1}{p_{ix}}, \sum_j p_{xj} \log \frac{1}{p_{xj}} \right\}} \\
H_6 &= n^+ & H_{13} &= \sqrt{1 - \exp \left[-2 \sum_{ij} p_{ix} p_{xj} \log \frac{1}{p_{ix} p_{xj}} \right]} \\
&= \sum_k k p_k^+ \\
H_7 &= (k-n^+)^2 p_k^+ & Lac &= \sqrt{N \sum_{ij} p_{ij}^2 - 1}
\end{aligned}$$

Definiciones auxiliares

$$p_k^+ = \sum_{|i+j|=k} p_{ij} \quad p_k^- = \sum_{|i-j|=k} p_{ij} \quad p_{ix} = \sum_j p_{ij} \quad p_{xj} = \sum_i p_{ij} \quad n^- = \sum_k k p_k^-$$

Tabla 5.2: Definiciones matemáticas de las variables texturales de Haralick.

DISCUSIÓN



H. H. WILSON

En los últimos años muchos autores han destacado el alto **potencial de las técnicas acústicas para el estudio de la zona marina sumergida** (Blondel, 2007; Anderson *et al.*, 2008; Brown *et al.*, 2011). Las características de propagación de la onda acústica en la columna de agua y los procesos de rebote que tienen lugar cuando ésta intercepta alguna superficie (obstáculo), convierten a la acústica submarina en una herramienta sumamente útil, cuyo uso se prevé que aumente significativamente en el futuro, como ponen de manifiesto las aplicaciones presentadas en los capítulos 2-5.

Sin embargo, tal y como se expuso en (ver sección 1.2 y 1.3), **estas tecnologías tienen en la actualidad limitaciones importantes que restringen su utilización**. En primer lugar se sitúa el elevado coste tanto del equipamiento acústico como de los software específicos para el tratamiento de los datos adquiridos con las sondas. Además estos softwares funcionan en muchos casos como “*cajas negras*” en las que se introducen datos acústicos y devuelven resultados (clasificación de fondos, evaluación de *stocks* pesqueros...), pero donde una parte relevante de los algoritmos en que se basan los procesos que realizan es desconocida para el usuario. Por otro lado, la transferencia de conocimiento efectiva desde los desarrolladores de métodos a usuarios no especializados es escasa. Debido a las bases físicas de su funcionamiento, las técnicas acústicas hacen preciso un cierto grado de conocimiento técnico y científico muy específico para manipular el instrumental; además de un conocimiento estadístico también específico para sacar el máximo partido a los métodos de análisis. La inexistencia hasta el momento de un esfuerzo serio de comunicación que presente los conceptos físicos y la utilización de los equipos acústicos de un modo sencillo, adaptado a usuarios no especializados, ha hecho que estas tecnologías estén relegadas a un uso minoritario limitando tanto su popularización como la diversificación de sus aplicaciones. Como consecuencia de las limitaciones anteriores, las aplicaciones de estas tecnologías evolucionan de forma muy lenta, ciñéndose casi en exclusiva a los usos específicos para los que los software y hardware comerciales están diseñados, y frenando así el aprovechamiento del potencial de estas tecnologías.

Esta situación coloca **las tecnologías acústicas al alcance de pocos colectivos de usuarios**. Desde su popularización más allá del ámbito militar (década de 1950), estas tecnologías han sido utilizadas casi en exclusiva por grupos de investigación con financiación elevada, pertenecientes a universidades o centros científicos de países con presupuestos públicos altos para ciencia y tecnología. En los últimos años también han aparecido empresas que desarrollan y utilizan estas tecnologías para dar servicios a terceros, pero dado que

el importe del equipamiento que deben amortizar es muy elevado, los productos finales siguen teniendo costes que los sitúan al alcance únicamente de los usuarios anteriores o de algunas grandes empresas.

Sin embargo, dada su aplicabilidad en los estudios costeros, conocida y potencial, estas tecnologías tienen gran utilidad para un espectro muy amplio de usuarios potenciales que a día de hoy no pueden acceder a ellas. Forman parte de estos usuarios potenciales todos los grupos de investigación que trabajan en la zona costera en cualquier línea de investigación con componente espacial (gestión de recursos, estudio de comunidades...) y todos aquellos que necesitan generar conocimiento sobre la zona costera para la toma de decisiones de gestión o desarrollo de proyectos. Además, son usuarios potenciales las administraciones nacionales y regionales. En algunos casos estas administraciones han gestionado sin disponer ni generar conocimiento científico de sus áreas costeras, lo que ha constituido una restricción fundamental para la sostenibilidad de los ecosistemas afectados. Pero en la actualidad estas instituciones valoran cada vez más el contar con información de calidad del medio costero. A todos los anteriores se unen otro grupo de usuarios “finales” constituido por aquellos que, sin tener que ser usuarios de las tecnologías acústicas, podrían beneficiarse sustancialmente del conocimiento del medio que estas tecnologías aportan en el desarrollo de sus actividades. Ejemplos son los pescadores o incluso grupos dedicados al uso lúdico y deportivo del área costera (buceadores, pescadores recreativos).

Acercar las técnicas acústicas a esta comunidad de usuarios potenciales es un paso fundamental para incrementar su uso e impulsar el planteamiento de nuevas aplicaciones y el diseño de equipos más económicos. De este modo se estimulará la demanda y la apertura del conocimiento, como ha sucedido en el caso de otras tecnologías. Este acercamiento pasa necesariamente por la reducción de algunas de las limitaciones explicadas anteriormente: reducción de costes, aumento en la transparencia de los procesos, y comunicación efectiva de las metodologías. Los capítulos anteriores constituyen una incitativa en este sentido. Tal y como planteaba el objetivo principal de este trabajo (1.4), cada uno de los capítulos explora una nueva aplicación de las tecnologías acústicas para el estudio de los hábitats bentónicos en la zona costeras. Estas aplicaciones se han desarrollado con un compromiso real con la disminución de costes: elección de los instrumentos de menor precio de mercado, implementación de software libre, de acceso gratuito y con código accesible para permitir un desarrollo posterior. Además, a estas aplicaciones les precede una presentación de las bases físicas sobre las que se sustentan estas tecnologías, en las que se ha hecho un

esfuerzo por primar la claridad y simplicidad para potenciar la transferencia de conocimiento a usuarios no especializados.

Todos los documentos orientados a la iniciación en el uso de herramientas de acústica submarina presuponen un perfil técnico a sus lectores, de formación en física o ingeniería. Las monografías (Urlick, 1975; Medwin, 2005; Lurton, 2002) dedicadas a esta disciplina abordan con profundidad todos los procesos físicos que tienen lugar en la insonificación de la columna de agua, pero tratan el tema con un nivel de detalle matemático que las aleja de las personas sin formación especializada en ingeniería o física, que quieren iniciarse en la disciplina de la acústica submarina para aplicarla como herramienta de estudio en su ámbito de trabajo. Asimismo, los artículos científicos publicados no profundizan en las metodologías utilizadas (en muchos casos por no conocerlas con detalle al utilizar software comercial) y no están escritos pensando en nuevos públicos. Estas fuentes científicas convencionales no favorecen la transferencia de conocimiento a usuarios no especializados, lo que alimenta la falsa creencia de que estas tecnologías están necesariamente fuera del alcance de usuarios sin amplia formación tecnológica y científica. Sin embargo, el uso de técnicas acústicas no requiere de conocimientos avanzados de física e ingeniería, sino una comprensión básica y operativa de los procesos que intervienen en la insonificación del objeto de estudio y en la toma de datos. Un esfuerzo por difundir este tipo de conocimiento redundará en el aumento sustancial del número de usuarios, tal y como sucedió con las técnicas de teledetección óptica, hoy en día ampliamente difundidas y utilizadas por profesionales de diferentes disciplinas (geografía, biología, meteorología, ecología, etc.).

Con el **objetivo de generar un documento que cubriese esta necesidad** y, de este modo, colaborar en la apertura de los métodos acústicos a nuevos usuarios, en este trabajo se ha realizado un esfuerzo para presentar, de una forma sencilla e intuitiva, las bases y procesos físicos sobre los que se sustentan las técnicas acústicas de estudio de la zona sumergida. Estos conceptos y procesos se han expuesto en la sección 1.3, destinada a la iniciación de profesionales interesados en el uso de las técnicas acústicas, sin requerir de estos unos conocimientos profundos de partida sobre la física involucrada. La difusión del conocimiento en un lenguaje asequible al público objetivo, y la aproximación de la herramienta al usuario (la desmitificación de la herramienta), son el primer paso para facilitar su uso y promover, así, la innovación.

A pesar de la proliferación de las publicaciones que emplean herramientas acústicas para el estudio de la zona costera en la última década (secciones 1.2 y 1.4),

son pocas las que abordan nuevas metodologías que vayan más allá de la replicación de procesos estandarizados a áreas de estudio concretas. Por el contrario, en este documento se exploran nuevas metodologías, no utilizadas hasta el momento o incluyendo modificaciones a otras ya conocidas. Concretamente, en las aplicaciones anteriores se han utilizado técnicas acústicas habitualmente restringidas a la evaluación de *stocks* pesqueros con el objetivo de cartografiar bivalvos infaunales (capítulo 5), se han realizado correcciones estadísticas a los datos adquiridos por la sonda y se han complementado con información geográfica digitalizada para disminuir los errores en la generación de batimetrías (capítulo 2), se han implementado nuevas correcciones físicas a los datos acústicos, mejorando los resultados obtenidos con las metodologías estándar más sencillas para la cartografía de hábitats bentónicos (capítulo 3) y se ha optimizado el modo de trabajo del equipamiento acústico para obtener información de altura de vegetación submarina (capítulo 4). Estas aplicaciones, sin embargo, no son más que ejemplos de metodologías alternativas potenciales que podrían desarrollarse con costes reducidos, generando transferencia de conocimiento e impulsando la investigación con la experiencia y demanda de los usuarios.

En nuestro caso, esta innovación ha sido posible gracias al **desarrollo de software específico para este trabajo**, lo que ha permitido superar las limitaciones metodológicas asociadas al software propietario, pudiendo implementar procesos no utilizados hasta el momento y, por lo tanto, no incluidos en el software disponible comercialmente.

De forma habitual el software libre nace para satisfacer una necesidad de una persona o colectivo que no se ve cubierta por el software propietario disponible al que tienen acceso (en función de sus costes). Durante su proceso de desarrollo o una vez este ha finalizado, el software libre se hace público con un doble objetivo: que pueda ser aprovechado por cualquiera que le encuentre utilidad, y que continúe su desarrollo con la ayuda de la comunidad de usuarios que lo utilizan (un proceso similar al que sigue el conocimiento científico a través de las publicaciones y foros de comunicación). Para las aplicaciones presentadas en los capítulos anteriores se ha desarrollado software libre bajo licencia LGPL que permite el libre uso y modificación del código desarrollado². Junto con el software se ha generado una documentación exhaustiva y accesible de todos los procesos llevados a cabo por el mismo, para facilitar así su uso y edición por parte de otros usuarios.

²<http://www.gnu.org/licenses/#GPL>

El desarrollo de este software ha dotado a este trabajo de más versatilidad; además, al publicarlo en Internet, poniéndolo al alcance de todos bajo una licencia de código abierto, se facilita el acceso a la herramienta al **coste más reducido**, y se fomenta la colaboración comunitaria para mejorarla. Sin embargo, este acercamiento del procesamiento de datos a los usuarios no sería eficiente, ni ayudaría al acercamiento de las tecnologías a estos usuarios, si no fuese acompañada de una elección de equipos acústicos portátiles y de opciones simples (monohaz frente a multihaz, por ejemplo). El Lamont-Doherty Earth Observatory de la Universidad de Columbia, por ejemplo, ha desarrollado un software libre para el cálculo de batimetrías, que está en su web accesible a todos los usuarios³. Sin embargo este software está diseñado para el análisis de datos adquiridos con una sonda multihaz (de alto coste), lo que sigue manteniendo la aplicación fuera del alcance de un gran número de usuarios. En los capítulos previos se presentan trabajos en los que se complementa equipamiento, software y metodología, para que su conjunto constituya una aplicación de bajo coste que aumente su accesibilidad.

Para poner cifras a estas diferencias de costes, podemos utilizar el caso de la generación de una batimetría. La herramienta más utilizada para esto es la sonda multihaz, que tiene un precio en el mercado de unos 100 000 €. Con estas sondas se obtiene una cobertura total del área muestreada con una resolución vertical de 5 – 10 cm. La alternativa de bajo coste es una sonda monohaz, que puede ser adquirida por unos 10 000 €. Los datos obtenidos con esta sonda necesitan un proceso de interpolación para generar una superficie batimétrica continua (dado que no realiza una cobertura completa) y el resultado final tendrá un error medio del orden de 55 – 75 cm (estimado fuera de los transectos acústicos) y de 20 – 25 cm (estimado en los transectos acústicos). Por simplificar, podemos suponer que ambos equipamientos tienen los mismos requerimientos de material complementario (GPS, sensor de cabeceo, etc.), embarcación (300€/día por una embarcación de recreo de 5 m de eslora con patrón) y personal (aunque los trabajos publicados con sondas multihaz suelen utilizar embarcaciones de mayor envergadura y material complementario más caro), y que en los dos casos los datos se cuenta con software gratuito. En este supuesto la diferencia de los gastos entre ambos métodos la establecen el coste de las sondas. Para todos aquellos trabajos en los que la precisión obtenida por la sonda monohaz es suficiente, el coste de una campaña con esta sonda sería 10 veces menor que la realizada con una sonda multihaz (y por lo tanto haría más asequible la adquisición periódica).

³<http://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/MB-System/>

A pesar de la importancia de la disminución de costes sería un error limitar el impacto del desarrollo del software libre simplemente al abaratamiento del coste. El modelo de software escogido cuenta con un carácter abierto que **permite realizar una evaluación crítica de los resultados de los trabajos que lo utilicen**. Conocer cada uno de los pasos de los procesos implicados permite tanto su evaluación como su modificación y mejora, una parte fundamental del trabajo científico que se ve restringida por el uso de software comercial.

El software Sonar5 (ver sección 1.4) representa un ejemplo de este cambio de perspectiva. Su diseñador y comercializador, Helge Balk (University of Oslo), distribuye el programa a través de Internet⁴ siguiendo una política de licencias flexibles a través de la cual establece colaboraciones con muchos de los usuarios y realiza modificaciones en el programa para adaptarlo a sus necesidades. De este modo el investigador o técnico cuenta con la versatilidad que la mayoría de los programas comerciales eliminan. Una extensa documentación del programa permite además el análisis crítico de los procesos realizados.

Las **aplicaciones presentadas en los capítulos anteriores** dan respuesta a necesidades reales de conocimiento de la zona costera. De hecho, cada una de ellas fue desarrollada atendiendo a una demanda que, en el marco del desarrollo de un proyecto de investigación, fue planteada por parte de los gestores del sector pesquero (capítulos 2, 3 y 5) o que fue detectada por la Administración para la gestión del área costera (capítulo 4).

Como se exponía en los objetivos, una de las primeras necesidades para llevar a cabo un estudio costero de carácter ambiental (geomorfológico, ecológico, etc.) es conocer la **topografía del área de estudio**. Para obtener una batimetría en este tipo de áreas se utilizan metodologías muy diferentes. Como método de mayor resolución, cuando la disponibilidad de recursos económicos lo permite, se trabaja con sondas multihaz, obteniendo información de calidad pero a un elevado coste. En el extremo contrario están los usuarios con escasos presupuestos y sin conocimientos específicos de acústica, que utilizan la información presente en las cartas náuticas para generar superficies batimétricas mediante la interpolación de los datos que aparecen en ellas. La aplicación presentada en el capítulo 2 permite generar superficies batimétricas de áreas someras con buena resolución horizontal y vertical (50 m y 55 – 75cm respectivamente), siguiendo una metodología sencilla y clara, y utilizando equipamiento de bajo coste. De este modo constituye una alternativa barata y sencilla a los métodos

⁴http://folk.uio.no/hbalk/sonar4_5/index.htm

utilizados comercialmente y con una resolución mucho más alta que las superficies obtenidas mediante la interpolación de los datos de las cartas náuticas. Su uso permitirá a nuevos usuarios con escasos presupuestos y/o formación específica (organizaciones de pescadores, asociaciones de buceadores, grupos de investigación, técnicos dedicados a la gestión de estas zonas etc.) producir este tipo de información directamente .

La gestión de la zona costera pasa en muchos casos por la zonificación de usos, para la cual es necesario conocer el **tipo de hábitats bentónicos** que existen bajo la columna de agua. Actualmente los métodos acústicos son la respuesta a esta necesidad. Sin embargo, las metodologías y algoritmos de clasificación de hábitats bentónicos son implementados en su mayoría por empresas especializadas que los comercializan a través de paquetes de software propietario. Alternativamente, existen grupos de investigación que proponen metodologías propias, pero que normalmente no generan herramientas que puedan ser utilizadas por otros usuarios. La principal alternativa para éstos son los métodos directos, que obtienen información de calidad pero impiden obtener una cobertura espacial alta.

La metodología presentada en el capítulo 3 representa una alternativa asequible (en términos de coste y complejidad técnica) con la que se obtienen clasificaciones de fondo con precisiones comparables a las publicadas con software comercial (RoxAnn y QTC), disminuyendo algunas de sus limitaciones (dependencia con la profundidad). Al realizar el procesamiento de los datos con software libre fue posible implementar nuevas correcciones, particularmente adecuadas para esta zona de estudio, lo cual no podría haberse llevado a cabo utilizando software comercial. Así, en este momento sería posible para cualquier colectivo interesado abordar la cartografía y clasificación de hábitats bentónicos en un área costera, procesando con las herramientas desarrolladas los datos obtenidos con una ecosonda monohaz común.

Actualmente existe un interés creciente por la localización y el estado de los **campos de fanerógamas o los bosques de macroalgas** (especies que las constituyen, porte de las hojas, etc.). En el capítulo 4 de este trabajo se ha presentado una metodología basada en la estimación de alturas de las estructuras vegetales situadas sobre el fondo, que permite cartografiar estos hábitats y caracterizar las especies que los constituyen. El uso de las alturas como variable de caracterización se comparte con otros trabajos publicados recientemente (ver discusión del capítulo 4) pero a diferencia de estos, el equipo utilizado en este caso es de coste reducido y de propósito general (el sónar de barrido lateral es una herramienta con un alto número de aplicaciones en los estudios del

fondo: clasificación de hábitats, estudios de texturas, cartografía de arrecifes, etc., por lo que es habitual que muchos centros de investigación dispongan de él).

Otro de los frentes abiertos de la gestión costera es el **manejo de los recursos explotados**. En este caso los sistemas acústicos han sido utilizados casi de forma exclusiva en las evaluaciones de stocks pesqueros pelágicos y, en algunos casos aislados, en la cartografía de áreas de explotación de bivalvos epibentónicos (que viven sobre el sedimento). Pero existe también un alto número de recursos explotados (moluscos y crustáceos) de elevado valor económico endobentónicos (que se encuentran dentro del sedimento) y cuya gestión se resiente de la falta de herramientas eficientes para generar cartografías de su abundancia y distribución. En este sentido el capítulo 5 de este trabajo abre una puerta al uso de las tecnologías acústicas en la cartografía de recursos endobentónicos, constituyendo una primera aproximación de cartografía remota de este tipo de recursos. El trabajo futuro en esta línea podría generar diversas aplicaciones en un campo que todavía tiene a los métodos directos como única opción de cartografiado.

En resumen, las metodologías y aplicaciones diseñadas e implementadas en los capítulos anteriores abren nuevas oportunidades para la utilización de datos acústicos (de alta resolución espacial y capacidad para cubrir grandes áreas) en la gestión de las áreas costeras y sus recursos marinos, sin necesidad de costes elevados. Este trabajo debe complementarse con el desarrollo de canales donde comunicar los detalles de estas metodologías (no limitándose a artículos científicos escuetos donde las metodologías no son ampliamente explicadas). Por otro lado debería realizarse un esfuerzo por mejorar la *facilidad de uso* de los programas desarrollados para facilitar su utilización por usuarios no especialistas. Por último, es fundamental mantener activa la colaboración entre desarrolladores y usuarios de estas tecnologías, para el conocimiento de nuevas necesidades prácticas a las que dar respuesta.

CONCLUSIONES

Basándonos en los objetivos planteados en este trabajo y en el desarrollo y los resultados presentados, se extraen las conclusiones de esta tesis que se presentan a continuación. Dado que cada uno de los capítulos centrales presenta ya un apartado con conclusiones detalladas, en este caso solo presentaremos las conclusiones generales que se extraen de cada uno de ellos.

- Los datos batimétricos adquiridos con una sonda monohaz, corregidos estadísticamente para eliminar el efecto del movimiento del barco y del error del GPS, y completados con información cartográfica de los límites de la zona sumergida, permiten obtener batimetrías de calidad de las aguas poco profundas de la zona costera.
- El cálculo de variables derivadas de la energía contenida en el primer y segundo eco de diferentes frecuencias (38 y 200 kHz en nuestro caso), y su posterior corrección para eliminar el efecto de la profundidad a tres niveles (tiempo, energía y duración del pulso), permite realizar clasificaciones de hábitats bentónicos atendiendo a su sustrato y granulometría, en áreas con significativas diferencias de profundidad y cambios rápidos de tipo de fondo, como las áreas costeras.
- El uso de un transductor SSS insonificando *cuasi* verticalmente el fondo desde la embarcación permite obtener ecogramas a partir de los cuales es posible observar y estimar la altura de la vegetación presente sobre el fondo. Esto constituye una herramienta adecuada para la cartografía de praderas de fanerógamas y bosques de algas.
- La información angular obtenida con las sondas *splitbeam* contiene, además de información de objetos presentes en la columna de agua, información relativa a la estructura del fondo, que puede ser utilizada para la cartografía de bancos de bivalvos endobentónicos, constituyendo una herramienta muy útil para su evaluación y gestión.

Además, el conjunto de la investigación desarrollada en esta tesis permite extraer las siguientes conclusiones:

- Las herramientas acústicas son técnicas de gran utilidad para el conocimiento de las áreas sumergidas de las zonas costeras y, mas allá de sus aplicaciones habituales, tienen grandes posibilidades por explorar, que podrían dar respuesta a las crecientes demandas de información de los procesos de gestión costera.

- Los sistemas cerrados (en que no se conocen los algoritmos de análisis de datos) basados en software propietario constituyen restricciones para el avance de la tecnología y la transferencia de conocimiento. Las políticas de apertura de la información y el desarrollo de software libre han representado en el pasado un impulso significativo para muchas tecnologías (la teledetección espacial, por ejemplo), y podrán hacerlo también en el campo de la hidroacústica.
- Las herramientas acústicas no tienen que estar restringidas a usuarios expertos en acústica o con elevados recursos financieros. Su utilización no requiere necesariamente de unos conocimientos avanzados de física sino únicamente de una comprensión profunda de sus principios de funcionamiento y existen opciones baratas de los equipos que pueden ser suficientes para cumplir muchos objetivos. La comunidad científica tiene la responsabilidad de realizar un gran esfuerzo de divulgación de estas metodologías de una forma comprensible, facilitando su replicabilidad.

BIBLIOGRAFÍA



Bibliografía

- C.F. Adams, B.P. Harris, M.C. Marino II y K.D.E. Stokesbury. Quantifying sea scallop bed diameter on Georges Bank with geostatistics. *Fisheries Research*, 106:460–467, 2010.
- M.A. Ainslie. The sonar equations: definitions, dimensions and units of individual terms. En *Proceedings of the Acoustics 2008*, páginas 2637–2641, 2008.
- Y.C. Allen, C.A. Wilson, H. Roberts y J. Supan. High Resolution Mapping and Classification of Oyster Habitats in Nearshore Louisiana Using Sidescan Sonar. *Estuaries and Coasts*, 28:435–446, 2005.
- A. Alonso y J.L. Pagés. Evolución del nivel del mar durante el Holoceno en el Noroeste de la Península Ibérica. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 23:157–167, 2010.
- R. Alquezar y W. Boyd. Development of rapid, cost effective coral survey techniques: tools for management and conservation planning. *Journal of Coastal Conservation*, 1:105–119, 2007.
- J. Anderson, D. Van Holliday, R. Kloser, D. Reid y Y. Simard. Acoustic seabed classification: current practice and future directions. *ICES Journal of Marine Science*, 65:1004–1011, 2008.

- J.T. Anderson, R.S. Gregory y W.T. Collins. Acoustic classification of marine habitats in coastal Newfoundland. *ICES Journal of Marine Science*, 59: 156–167, 2002.
- S. Andréfouët, F.E. Muller-Karger, C. Hochberg, E.J. Hu y K.L. Carder. Change detection in shallow coral reef environments using Landsat 7 ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*, 78:150–162, 2001.
- G. Ardizzone, A. Belluscio y L. Maiorano. Long-term change in the structure of a *Posidonia oceanica* landscape and its reference for a monitoring plan. *Marine Ecology*, 27:299–309, 2006.
- L. Atallah, P.J. Probert-Smith y C.R. Bates. Wavelet analysis of bathymetric sidescan sonar data for the classification of seafloor sediments in Hopvagen Bay-Norway. *Marine Geophysical Researches*, 23:431–442, 2002.
- J.A. Aznar. Análisis estructural del sector turístico en Almería. *Cuadernos de Turismo*, 11:21–39, 2003.
- J.A. Aznar y A. Sánchez-Picón. Innovación y distrito en torno a un “milagro”: la configuración del sistema productivo local de la agricultura intensiva de Almería. *Revista de Historia Industrial*, 42:157–192, 2010.
- A. Basu y W. Maczkowska. Bathymetry map analysis using simulated annealing on a gis platform. En *OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition*, volumen 4, páginas 2407–2414, 2001.
- A. Basu y S. Malhotra. Error detection of bathymetry data by visualization using GIS. *ICES Journal of Marine Science*, 59:226–234, 2002.
- C.R. Bates y E.J. Whitehead. ECHOplus Measurements in Hopavagen Bay, Norway. En *Proceedings of the Biennial Scientific Meeting of the Oceanography Society*, 2001.
- J. Becker y D.T. Sandwell. Global estimates of seafloor slope from single-beam ship soundings. *Journal of Geophysical Research*, 113, 2008.
- M.J. Behrenfeld, R.T. O’Malley, D.A. Siegel, C.R. McClain, J.L. Sarmiento, G.C. Feldman, A.J. Milligan, P.G. Falkowski, R.M. Letelier y E.S. Boss. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444:752–755, 2006.

- T. Belsher, A. Meinesz, J.R. Lefevre y C. Boudouresque. Simulation of SPOT Satellite Imagery for Charting Shallow-Water Benthic Communities in the Mediterranean. *Marine Ecology*, 9(2):157–165, 1988.
- M. Belzunce, R.M. Navarro y H.F. Rapoport. Seed and early plantlet structure of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. *Aquatic botany*, 82:269–283, 2005.
- V. Benedito, J. Torres, I.M. Giner, J.L. Esteban, R. Capaccioni y A.M. García-Carrascosa. Distribution and preliminary evaluation of the state of the *Posidonia oceanica* on the coast of the Gulf of Valencia (Spain, western Mediterranean). En *Rapport Commission Internationale Mer Méditerranée*, volumen 32, página 8. 1990.
- O. Bergem, E. Pouliquen, G. Canepa y N.G. Pace. Time-evolution modeling of seafloor scatter. II. Numerical and experimental evaluation. *Journal of Acoustical Society of America*, 105:3142–3150, 1999.
- B.R. Biffard, S.F. Boomer, N.R. Chapman y J.M. Preston. The Role of Echo Duration in Acoustic Seabed Classification and Characterization. En *OCEANS 2010*, páginas 1–8. IEEE, 2010.
- R. Blanco Chao y A. Pérez Alberti. Formas litorales en la costa noroccidental gallega. Los sectores acantilados entre Cabo Prioriño (Ferrol) y Punta Frouxeira (Valdoviño). *Geographica*, 33:3–28, 1996.
- P. Blondel. Challenges in seafloor characterisation: from point to map. En *Proceeding of 19th International Congress on Acoustics*, página 6pp, 2007.
- H. Bodholt, H. Ness y H. Solli. A new echo-sounder system. En *Proceedings of the Institute of Acoustics*, volumen 11, páginas 123–130, 1989.
- J. Borum y T.M. Greve. The four European seagrass species. En J. Borum, C.M. Duarte, D. Krause-Jensen y T.M. Greve, editores, *European seagrasses: an introduction to monitoring and management*, páginas 1–7. The M&MS project, 2004.
- K.M. Boswell, M.P. Wilson y C.A. Wilson. Hydroacoustics as a Tool for Assessing Fish Biomass and Size Distribution Associated with Discrete Shallow Water Estuarine Habitats in Louisiana. *Estuaries and Coasts*, 30:607–617, 2007.

- C.F. Boudouresque, E. Charbonnel, A. Meinesz, G. Pergent, C. Pergent-Martini, G. Cadiou, M.C. Bertrand, P. Foret, M. Ragazzi y V. Rico-Raimondino. A monitoring network based on the seagrass *Posidonia oceanica* in the Northwestern Mediterranean sea. *Biologia Marina Mediterranea*, 7(2): 328–331, 2000.
- C.F. Boudouresque, G. Bernard, P. Bonhomme, E. Charbonnel, G. Diviacco, A. Meinesz, G. Pergent, C. Pergent-Martini, S. Ruitton y L. Tunesi. *Pré-servation et conservation des herbiers à Posidonia oceanica*. Ramoge pub, Marseille, France, 2006.
- S. Bourguignon, L. Berger, C. Scalabrin, R. Fablet y V. Mazauric. Methodological developments for improved bottom detection with the ME70 multibeam echosounder. *ICES Journal of Marine Science*, 66:1015–1022, 2009.
- R. Bozzano, L. Castellano y A. Siccardi. Characterization of submerged aquatic vegetation by a sector-scanning sonar. En A. Alippi y G.B. Canelli, editores, *Proceedings of the 4th European Conference on Underwater Acoustics*, páginas 159–164, Rome, Italy, 1998. Italian National Research Council.
- P. Brouwer. Seafloor classification using a single beam echosounder. Tesis de máster, University of Delft, 2008.
- C.J. Brown, K.M. Cooper, W.J. Meadows, D.S. Limpenny y H.L. Rees. Small-scale Mapping of Sea-bed Assemblages in the Eastern English Channel Using Sidescan Sonar and Remote Sampling Techniques. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54(2):263–278, 2002.
- C.J. Brown, S.J. Smith, P. Lawton y J.T. Anderson. Benthic habitat mapping: A review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 92(3):502–520, 2011.
- M.C. Buia, V. Zupo y L. Mazzella. Primary production and growth dynamics of *Posidonia oceanica*. *Marine Ecology*, 13(1):2–16, 1992.
- J. Burczynski. Bottom classification, 1999.
- A. Burke, Y. Kura, K. Kassem, C. Revenga, M. Spalding y D. McCallister. *Coastal zone: extend and change*, capítulo 2. World Resources Institute, Washington, DC, 2001.

- K.A. Burns, G. Brunskill, D. Brinkman y I. Zagorskis. Organic carbon and nutrient fluxes to the coastal zone from the Sepik River outflow. *Continental Shelf Research*, 28(2):283–301, 2008.
- S.E. Caddell. Application of an Acoustic sea Floor Classification System for Benthic Habitat Assessment. *Journal do Shellfish Research*, 15:1459–1461, 1998.
- B. Calder. On the Uncertainty of Archive Hydrographic Data Sets. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 31:249–265, 2006.
- G. Cambiè, P. Pita, D. Fernández-Márquez y R. Muiño. Preliminary results on Sargassum muticum (Phaeophyta) distribution in the Marine Reserve of Fishing Interest “Lira-Os Miñarzos” (Galicia, NW Spain). En *Book of Abstracts. II International Symposium in Marine Sciences*, 2009.
- G. Canepa, O. Bergem y N.G. Pace. A New Algorithm for Automatic Processing of Bathymetric Data. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 28:62–77, 2003.
- R. Carbó y A. Molero. Scattering Strength of a Gelidium Biomass Bottom. *Applied Acoustics*, 51(4):343–351, 1997.
- D.W. Caress y D.N. Chayes. Mapping the seafloor: Software for the processing and display of swath sonar data, 2011.
- R.W.G. Carter. *Coastal environments: An Introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines*. London, 1989.
- G. Casal, N. Sanchez-Carnero y J. Freire. Generación de una línea de costa digital de Galicia (NW España) a gran escala, utilizando fotointerpretación y segmentación dinámica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 53:7–19, 2010.
- G. Casal, T. Kutser, J.A. Domínguez-Gómez, N. Sanchez-Carnero y J. Freire. Mapping benthic macroalgal communities in the coastal zone using CHRIS-PROBA mode 2 images. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 94:281–290, 2011a.
- G. Casal, N. Sanchez-Carnero, E. Sánchez-Rodríguez y J. Freire. Remote sensing with SPOT-4 for mapping kelp forests in turbid waters on the south European Atlantic shelf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 91:371–378, 2011b.

- S.E. Chang, B.J. Adams, J. Alder, P.R. Berke, R. Chuenpagdee, S. Ghosh y C. Wabnitz. Coastal Ecosystems and Tsunami Protection after the December 2004 Indian Ocean Tsunami. *Earthquake Spectra*, 22:S863–S887, 2006.
- V. Chaplot, F. Darboux, H. Bourennane, S. Leguédou, N. Silvera y K. Phachomphon. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. *Geomorphology*, 77:126–141, 2006.
- J. Clark. *Coastal zone management handbook*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 1996.
- J.R. Clark. Integrated management of coastal zones. Informe técnico 327, FAO Fisheries, Rome, 1994.
- P.A. Clarke y L.J. Hamilton. The ABCS Program for the Analysis of Echo Sounder Returns for Acoustic Bottom Classification. Informe técnico, DSTO, Defense Science & Technology organisation, 1999.
- J. Cohen. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20:37–46, 1960.
- P. Colantoni, P. Gallignani, E. Fresi y F. Cinelli. Patterns of *Posidonia oceanica* (L.) Delile. Beds around the Island of Ischia (Gulf of Naples) and in Adjacent Waters. *Marine Ecology*, 3:53–74, 1982.
- W.T. Collins, R. Gregory y J. Anderson. A digital approach to seabed classification. habitat assessment for juvenile cod is just one application of this acoustic method. *Sea Technology*, 37:83–87, 1996.
- Conselleria do Mar Xunta de Galicia. Fondo social europeo, jun 2011.
- R. Costanza y J. Farley. Ecological economics of coastal disasters: Introduction to the special issue. *Ecological Economics*, 63:249–253, 2007. Ecological Economics of Coastal Disasters - Coastal Disasters Special Section.
- A.P. Cracknell. Remote sensing techniques in estuaries and coastal zones an update. *International Journal of Remote Sensing*, 20(3):485–496, 1999.
- X. Cunjin, D. Qing y J. Xie. Spatio-temporal variability of western Pacific warm pool eastern edge and its relationship with ENSO. En *18th International Conference on Geoinformatics*, 2010.

- G.R. Cutter y D.A. Demer. Multifrequency biplanar interferometric imaging. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7:171–175, 2010.
- M. Cuvelier. Surveillance en temps réel de l'évolution des herbiers: nouvelle méthode de recensement des herbiers par cartographie au sonar lateral. *Rapport P.V. Réunions Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Méditerranée*, 1976.
- P. Dartnell y J.V. Gardner. Predicting Seafloor Facies from Multibeam Bathymetry and Backscatter Data. *Photogrammetric engineering & Remote Sensing*, 70:1081–1091, 2004.
- S. De Grave, H. Fazakerley, L. Kelly, M. Guiry, M. Ryan y J. Walshe. A Study of Selected Maerl Beds in Irish Waters and their Potential for Sustainable Extraction. Informe técnico, Marine Institute, 2000.
- O.Y. De Vel y W. Bour. The structural and thematic mapping of coral reefs using high Resolution SPOT data: Application to the Tétémbia reef (New Caledonia). *Geocarto International*, 5, 1990.
- J.T. DeAlteris. The application of hydroacoustics to the mapping of subtidal oyster reefs. *Journal of Shellfish Research*, 7:41–45, 1988.
- D. Demer, G. Cutter, J. Renfree y J. Butler. A statistical-spectral method for echo classification. *ICES Journal of Marine Science*, 66:1081–1090, 2009.
- C. Den Hartog. *The Seagrasses of the World*. North Holland Publishing, Amsterdam, 1970.
- P. Descamp, G. Pergent, L. Ballesta y M. Foulquié. Underwater acoustic positioning systems as tool for *Posidonia oceanica* beds survey. *Biologies*, 328: 75–80, 2005.
- M. Desprez. Physical and biological impact of marine aggregate extraction along the French coast of the Eastern English Channel: short- and long-term post-dredging restoration. *ICES Journal of Marine Science*, 57:1428–1438, 2000.
- G. Di Maida, A. Tomasello, F. Luzzu, A. Scannavino, M. Pirrotta, C. Orestano y S. Calvo. Discriminating between *Posidonia oceanica* meadows and sand substratum using multibeam sonar. *ICES Journal of Marine Science*, 68(1): 12–19, 2011.

- R.J. Diaz, M. Solana y R.M. Valente. A review of approaches for classifying benthic habitats and evaluating habitat quality. *Journal of Environmental Management*, 73:165–181, 2004.
- E. Diaz-Almela, N. Marbá y C.M. Duarte. Consequences of Mediterranean warming events in seagrass (*Posidonia oceanica*) flowering records. *Global Change Biology*, 13(1):224–235, 2007.
- I. Djemali, R. Toujani y J. Gillard. Hydroacoustic fish biomass assessment in man-made lakes in Tunisia: horizontal beaming importance and diel effect. *Aquatic Ecology*, 43:1121–1131, 2009.
- J.A. Domínguez Gómez, E. Chuvieco Salinero y A. Sastre Merlín. Monitoring transparency in inland water bodies using multispectral images. *International Journal of Remote Sensing*, 30:1567–1586, 2010.
- M. Dommissse y D. Urban. A trial of the VBT seabed classification system for habitat mapping around Kodiak Alaska. Informe técnico, 2001.
- M. Dommissse, D. Urban, B. Finney y S. Hills. Potential Depth Biasing Using the Biosonics VBT Seabed Classification Software. *Marine Technology Society Journal*, 39:90–93, 2005.
- P. Doucette y K. Beard. Exploring the Capability of Some GIS Surface Interpolators for DEM Gap Fill. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66:881–888, 2000.
- D. Doxaran, J.M. Froidefond, S. Lavender y P. Castaing. Spectral signature of highly turbid waters: Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote Sensing of Environment*, 81:149–161, 2002.
- C.M. Duarte. Use of echosounder tracings to estimate aboveground biomass of submerged plants in lakes. *Canadian Journal of Fishes and Aquatic Sciences*, 44:732–735, 1987.
- EGMASA. Implementación de nuevas tecnologías mediante la aplicación al sector medioambiental de metodologías avanzadas con sensores hiperespectrales - caracterización de praderas de fanerógamas marinas. Informe técnico, EGMASA, 2009.

- Environmental Justice Foundation. Mangrove's: Nature's defence against tsunamis - a report on the impact of mangroves loss and shrimp farm development on coastal defences. Informe técnico, Environmental Justice Foundation, London, UK, 2005.
- S. Erdogan. A comparison of interpolation methods for producing digital elevation models at the field scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36:366–376, 2009.
- J.I. Fisher y J.F. Mustard. High spatial resolution sea surface climatology from Landsat thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*, 90:293–307, 2004.
- FISMARE. Avaliación da pesquería de navalla (*Ensis arcuatus*) da Ría de Pontevedra cara unha explotación sostible: estudio e integración dos aspectos biolóxicos e hidrodinámicos na súa explotación. Informe técnico, Fismare Innovación para la Sostenibilidad S.L., A Coruña, Spain, 2011.
- A. Fiuza, M. Hamann, I. Ambar, G. Diaz del Rio, N. González y J.M. Cabanas. Water masses and their circulation off western Iberia during May 1993. *Deep Sea Research*, 45:1127–1160, 1998.
- K. Foote, F.H. Kristensen y H. Solli. Trial of a new split-beam echosounder. Informe técnico Document 1984/B: 21, ICES, 1984.
- K.G. Foote. Measurement of fish target strength with a split-beam echo sounder. *Journal of the Acoustic Society of America*, 80:612–621, 1986.
- G. Foster, B.K. Walker y B.M. Riegl. Interpretation of Single-Beam Acoustic Backscatter Using Lidar-Derived Topographic Complexity and Benthic Habitat Classifications in a Coral Reef Environment. *Journal of Coastal Research*, special issue:16–26, 2009.
- G. Foster, V.S. Ticzonb, B.M. Riega y P.J. Mumby. Detecting end-member structural and biological elements of a coral reef using a single-beam acoustic ground discrimination system. *International Journal of Remote Sensing*, 32, 2011.
- R.L. Foster-Smith, C.J. Brown, W.J. Meadows, W. White y D.S. Limpenny. Mapping seabed biotopes at two spatial scales in the Eastern English Channel. Part 2: comparison of two Acoustic Ground-Discrimination Systems. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 8:489–500, 2004.

- F. Fraga. Upwelling off the Galician coast North West Spain. *Coastal and Estuarine Sciences*, 1:176–182, 1981.
- P. Fraile. *Análisis de las problemáticas asociadas a la especialización, evolución y representación de niveles del mar presentes y futuros en Andalucía*. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, 2011.
- J. Freire y A. García-Allut. Socioeconomic and biological causes of management failures in european artisanal fisheries: the case of Galicia (NW Spain). *Marine Policy*, 24:375–384, 2000.
- R. Freitas, S. Silva, V. Quintino, A.M. Rodriguez, K. Rhynas y W.T. Collins. Acoustic seabed classification of marine habitats: studies in the western coastal-shelf area of Portugal. *ICES Journal of Marine Science*, 60:599–608, 2003.
- R. Freitas, A.M. Rodrigues, E. Morris, J.L. Perez-Llorens y V. Quintino. Single-beam acoustic ground discrimination of shallow water habitats: 50 kHz or 200 kHz frequency survey? *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 78:613–622, 2008.
- E. Fresi y M. Saggiomo. Phosphorus uptake and transfer in *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Rapp. P.-v. Réun. Commn int. Explor. scient. Mer Méditerran.*, 27:187–188, 1981.
- A. Gagliardini, P. Dell’Arciprete y P. Yorio. Detección de procesos oceanográficos costeros mediante imágenes Landsat TM/ETM y sus implicancias para el estudio de la distribución reproductiva de aves marinas. En *V Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar y XIII Coloquio Internacional de Oceanografía, Resúmenes*, 2003.
- J.L. Galloway y W.T. Collins. Dual frequency acoustic classification of seafloor habitat using the QTC VIEW. En *OCEANS '98 Conference Proceedings*, páginas 1296–1300, 1998.
- I. Galparsoro, A. Borja, I. Legorburu, C. Hernández, G. Chust, P. Liria y A. Uriarte. Morphological characteristics of the Basque continental shelf (Bay of Biscay, northern Spain); their implications for Integrated Coastal Zone Management. *Geomorphology*, 118:314–329, 2010.
- Jay Gao. Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. *Progress in Physical Geography*, 33:103–116, 2009.

- J.A. García-Chartón, A. Pérez-Ruzafa, P. Sánchez-Jerez, J.T. Bayle-Sempere, O. Reñones y D. Moreno. Multi-scale spatial heterogeneity, habitat structure, and the effect of marine reserves on Western Mediterranean rocky reef fish assemblages. *Marine Biology*, 44:1–20, 2004.
- S. García-Gil, R. Durán y F. Vilas. Side scan sonar image and geologic interpretation of the Ría de Pontevedra seafloor (Galicia, NW Spain). *Scientia Marina*, 64:393–402, 2000.
- G. Giraud. Essai de classement des herbiers de *Posidonia oceanica* (Linné) Delile. *Botanica Marina*, 20(8):487–492, 1977.
- A.F.H. Goetz. Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. *Remote Sensing of Environment*, 113:S5–S16, 2009.
- G. Gopinath. Critical coastal issues of Sagar Island, east coast of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 160:555–561, 2010.
- J. Gower y S. King. Satellite Images Show the Movement of Floating Sargassum in the Gulf of Mexico and Atlantic Ocean. *Nature Precedings*, 2008.
- J. Grace, C. Nichol, M. Disney, P. Lewis, T. Quaife y P. Bowyer. Can we measure terrestrial photosynthesis from space directly, using spectral reflectance and fluorescence? *Global Change Biology*, 13:1484–1497, 2007.
- S.P.R. Greenstreet, I.D. Tuck, G.N. Grewar, E. Armstrong, D.G. Reid y P.J. Wright. An assessment of the acoustic survey technique, RoxAnn, as a means of mapping seabed habitat. *ICES Journal of Marine Science*, 54:939–959, 1997.
- W.W. Gregg y N.W. Casey. Global and regional evaluation of the SeaWiFS chlorophyll data set. *Remote Sensing of Environment*, 93:463–479, 2004.
- R.E. Grizzle, L.G. Ward, J.R. Adams, S.J. Dijkstra y B. Smith. Mapping and characterizing oyster reefs using acoustic techniques, underwater videography and quadrat counts. En *American Fisheries Society Symposium*, volumen 41, páginas 152–159, 2005.
- G. Guenther, A.G. Cunningham, P.E. LaRocque y D.J. Reid. Meeting the accuracy challenge in airborne LiDAR bathymetry. En *Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LiDAR*, páginas 1–27, 2000.
- A. Guilcher. *Morfología litoral y submarina*. Omega, Barcelona, 1957.

- A. E. Gusick y M. K. Faught. *Chapter 2 Prehistoric Archaeology Underwater: A Nascent Subdiscipline Critical to Understanding Early Coastal Occupations and Migration Routes, in Trekking the Shore: Changing Coastlines and the Antiquity of Coastal Settlement*. Springer Science+Business Media, New York, 2011.
- L.J. Hamilton. Acoustic seabed classification systems. Informe técnico, DSTO, Defense Science & Technology organisation, 2001.
- R.M. Haralick, K. Shanmugam y I.H. Dinstein. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics*, 3:610–621, 1973.
- P.T. Harris y R.J. Beaman. Processes controlling the formation of the Mertz Drift, George Vth continental shelf, East Antarctica: evidence from 3.5 kHz sub-bottom profiling and sediment cores. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50:1463–1480, 2003.
- G.J. Heald y N.G. Pace. An analysis of first and second backscatter for seabed classification. En *3rd European Conference on Underwater Acoustics.*, 1996.
- G.J. Heald y N.G. Pace. Implications of a bistatic treatment for the second echo from a normal incidence sonar. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(5):3093–3093, 1998.
- K.L. Heck y J.F. Valentine. Plant-herbivore interactions in seagrass meadows. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 330(1):420–436, 2006.
- S.A. Henson, J. L. Sarmiento, J. P. Dunne, L. Bopp, I. Lima, S. C. Doney, J. John y C. Beaulieu. Detection of anthropogenic climate change in satellite records of ocean chlorophyll and productivity. *Biogeosciences*, 7:621–640, 2010.
- L. Hernández, J. Ojeda-Zújar, N. Sánchez-Carnero y P. Máyer. Aproximación al análisis del desplazamiento de las dunas de Maspalomas (Gran Canaria, Islas Canarias). En *Investigaciones Recientes (2005-2007) en Geomorfología Litoral*. Universitat de les Illes Balears, 2007.
- W.D. Heyman, J-L. B. Ecochard y F.B. Biasi. Low-Cost Bathymetric Mapping for Tropical Marine Conservation: A Focus on Reef Fish Spawning Aggregation Sites. *Marine Geodesy*, 30:37–50, 2007.

- E. Hoffann y P. Dolmer. Effect of closed areas on distribution of fish and epibenthos. *ICES Journal of Marine Science*, 57:1310–1314, 2000.
- J. C. Hoffman, J. Burczynski, B. Sabol y M. Heilman. Digital acoustic system for ecosystem monitoring and mapping: assessment of fish, plankton, submersed aquatic vegetation, and bottom substrata classification, 2002.
- E. Hutin, Y. Simard y P. Archambault. Acoustic detection of a scallop bed from a single-beam echosounder in the St. Lawrence. *ICES Journal of Marine Science*, 62:966–983, 2005.
- International Hydrographic Organization. IHO standards for hydrographic surveys. Informe técnico 44, International Hydrographic Bureau, Monaco, 2008.
- International Hydrographic Organization. *Depth determination*, capítulo 3. International Hydrographic Bureau, Monaco, 2011.
- J.L. Irish y T.E. White. Coastal engineering applications of high-resolution LiDAR bathymetry. *Coastal Engineering*, 35:47–71, 1998.
- IUCN. *Conservation and sustainable development of the Alboran Sea*. International Union for Conservation of Nature, Gland, Switzerland and Malaga, Spain, 2010.
- D.R. Jackson y A.N. Ivakin. Scattering from elastic sea beds: First-order theory. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103:336–345, 1998.
- D.R. Jackson y M.D. Richardson. *High-frequency seafloor acoustics*. Springer, New York, 2007.
- M. Jakobsson, B. Calder y L. Mayer. On the effect of random errors in gridded bathymetric compilations. *Journal of Geophysical Research*, 107:2358–2369, 2002.
- G.S. Jamieson. Marine invertebrate conservation: evaluation of fisheries over-exploitation concerns. *American Zoology*, 33:551–567, 1993.
- G.S. Jamieson y A. Campbell. Estimations king crab (*Paralithodes camtschaticus*) abundance from commercial catch and research survey data. En *Proceedings of the North Pacific Symposium on Invertebrate Stock Assessment and Management*, páginas 73–83. NRC Research Press, 1998.

- T. JiangPing, Q. Ye, T. XeChang y C. JianBo. Species identification of chinese sturgeon using acoustic descriptors and ascertaining their spatial distribution in the spawning ground of Gezhouba Dam. *Chinese Science Bulletin*, 54: 3972–3980, 2009.
- T.M.S. Johnston, O.M. Cheriton, J.T. Pennington y F.P. Chavez. Thin phytoplankton layer formation at eddies, filaments, and fronts in a coastal upwelling zone. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(3-5):246–259, 2009.
- P. Justy, W. Siwabessy, J.D. Penrose, D. Fox y R. Kloser. Bottom Classification in the Continental Shelf: A Case Study for the North-west and South-east Shelf of Australia. En *Proceeding of the Australian Acoustical Society Conference*, páginas 1–6, 2000.
- B. Kádomtsev. *Ondas en nuestro alrededor*. MIR Moscú, Moscú, 1984.
- U. Kamp, T. Bolch y J. Olsenholler. Geomorphometry of Cerro Sillajhuay (Andes, Chile/Bolivia): Comparison of Digital Elevation Models (DEMs) from ASTER Remote Sensing Data and Contour Maps. *Geocarto Internacional*, 20:23–33, 2005.
- A. Kenny, I. Cato, M. Desprez, G. , Fader, R. Schüttenhelm y J. Side. An overview of seabed-mapping technologies in the context of marine habitat classification. *ICES Journal of Marine Science*, 60:411–418, 2003.
- M.A. Khan, Y.H. Fadlallah y K.G. Al-Hinai. Thematic mapping of subtidal coastal habitats in the western Arabian Gulf using Landsat TM data Abu Ali Bay, Saudi Arabia. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 1992.
- V. Klemas. Remote Sensing of Coastal Resources and Environment. *Environmental Research, Engineering and Management*, 48:11–18, 2009.
- R.J. Kloser, N.J. Bax, T. Ryan, A. Williams y B.A. Barker. Remote sensing of seabed types in the Australian Southeast Fishery; development and application of normal-incident acoustic techniques and associated ground truthing. *Marine and Freshwater Research*, 52:475–489, 2001.
- T. Komatsu, A. Mikami, S. Sultana, K. Ishida, T. Hiraishi y K. Tatsukawa. Hydro-acoustic methods as a practical tool for cartography of seagrass beds. *Otsuchi Marine Science*, 28:72–79, 2003.

- T. Komatsu, Y. Matsuoka, K. Shibata, T. Ikemori y N. Ohkei. Mapping and quantifying a Sargassum forest off Osaka (Toyama Bay, the Sea of Japan) by using narrow multibeam sonar and GIS. *GIS/spatial analyses in fisheries and aquatic sciences*, 3, 2007.
- V.E. Kostylev. Benthic habitat mapping from seabed acoustic surveys: do implicit assumptions hold? En M.Z. Li, C.R. Sherwood y P.R. Hill, editores, *Sediments, Morphology and Sedimentary Processes on Continental Shelves*. Wiley-Blackwell, in press.
- V.E. Kostylev, R.C. Courtney, G. Robert y B. Todd. Stock evaluation of giant scallop (*Placopecten magellanicus*) using high-resolution acoustics for seabed mapping. *Fisheries Research*, 60:479–492, 2003.
- C.W. Kovach, G.A. Borstad y M. Martínez de Saavedra. Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) imaging of the coastal zone near Tampa, Florida. En *Proceeding of the Simposio Seagrass Management: It's Not Just Nutrients!*, páginas 229–237, 2000.
- T. Kutser, I. Miller y D.L.B. Jupp. Mapping coral reef benthic substrates using hyperspectral space-borne images and spectral libraries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 70:449–460, 2006.
- G. Lamarche, X. Lurton, A-L. Verdier y J-M. Augustin. Quantitative characterisation of seafloor substrate and bedforms using advanced processing of multibeam backscatter-Application to Cook Strait, New Zealand. *Continental Shelf Research*, 31:S93–S109, 2011.
- U. Lechuga. Análisis de Modelos Digitales de Elevaciones aplicados a la Batimetría. Tesis de máster, Universidad de Sevilla, 2010.
- Z. Lee, C. Hu, B. Casey, S. Shang, H. Dierssen y R. Arnone. Global Shallow-Water Bathymetry From Satellite Ocean Color Data. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 91:429–, 2010.
- A. Lefebvre, C.E.L. Thomson, K.J. Collins y C. Amos. Use of a high-resolution profiling sonar and a towed video camera to map a *Zostera marina* bed, Solent, UK. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 82:323–334, 2009.
- P. Legendre, K.E. Ellingsen, E. Bjørnbom y P. Casgrain. Acoustic seabed classification: improved statistical method. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59:1085–1089, 2002.

- M.P. Lesser y C.D. Mobley. Bathymetry, water optical properties, and benthic classification of coral reefs using hyperspectral remote sensing imagery. *Coral Reefs*, 26:819–829, 2007.
- C. Lindenbaum, J.D. Bennell, E.I.S. Rees, D. McClean, W. Cook, A.J. Wheeler y W.G. Sanderson. Small-scale variation within a *Modiolus modiolus* (Mollusca: Bivalvia) reef in the Irish Sea: I. Seabed mapping and reef morphology. *Journal of Marine Biology Association of the United Kingdom*, 88: 133–141, 2008.
- Y. Lipkin, S. Beer y D. Zakai. The seagrasses of the eastern Mediterranean and the Red Sea. En E.P. Green y F.T. Short, editores, *World Atlas of Seagrasses*, páginas 65–73. University of California Press, Berkeley, 2003.
- X. Liu, J. Gómez-Dans y J. Griggs. High-resolution dem generated from LiDAR data for water resource management. En *Proceedings of International Congress on Modeling and Simulation 'MODSIM05'*, páginas 1402–1408, 2005.
- P. Lorance y V.M. Trenkel. Variability in natural behaviour, and observed reactions to an ROV, by mid-slope fish species. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 332:106–119, 2006.
- X. Lurton. *An Introduction to Underwater Acoustics. Principles and Applications*. Springer-Verlag, New York, 2002.
- J. Lyons. A hydroacoustic assessment of fish stocks in the River Trent, England. *Fisheries Research*, 35:83–90, 1998.
- P. Lyons. The potential impact of shell fragment distributions on high-frequency seafloor backscatter. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30: 843–851, 2005.
- M. Maceina y J.V. Shireman. The use of a recording fathometer for determination of distribution and biomass of *Hydrilla*. *Journal Aquatic Plant Management*, 18:34–39, 1980.
- M. J. Maceina, J.V. Shireman, K. A. Langeland y D.E. Canfield. Prediction of submersed plant biomass by use of a recording fathometer. *Journal Aquatic Plant Management*, 22:35–38, 1984.

- D.N. MacLennan, P.J. Copland, E. Armstrong y E.J. Simmonds. Experiments on the discrimination of fish and sea bed echoes. *ICES Journal of Marine Science*, 61:201–210, 2004.
- B.H. Magorrian, M. Service y W. Clarke. An Acoustic Bottom Classification Survey of Strangford Lough, Northern Ireland. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 75:987–992, 1995.
- T.J. Malthus y P.J. Mumby. Remote sensing of the coastal zone: an overview and priorities for future research. *International Journal of Remote Sensing*, 24:2805–2815, 2003.
- H.M. Manik, M. Furusawa y K. Amakasu. Measurement of sea bottom surface backscattering strength by quantitative echo sounder. *Fisheries Science*, 72: 503–512, 2006.
- N. Marbà, C.M. Duarte, J. Cebrián, S. Enríquez, M.E. Gallegos, B. Olesen y K. Sand-Jensen. Growth and population dynamics of *Posidonia oceanica* on the Spanish Mediterranean coast: elucidating seagrass decline. *Marine Ecology Progress Series*, 137:203–213, 1996.
- N. Marbà, C.M. Duarte, A. Alexandre y S. Cabaço. How do seagrasses grow and spread? En J. Borum, C.M. Duarte, Krause-Jensen D. y T.M. Greve, editores, *European seagrasses: an introduction to monitoring and management*, páginas 11–18. The M&MS project, 2004.
- C. Marcos-Diego, G. Bernard, J.A. García-Charton y A. Pérez-Ruzafa. Methods for studying impact on *Posidonia oceanica* meadows. En R. R. Goñi, M. Harmelin-Vivien, F. Badalamenti, L. Le Diréach y G. Bernard, editores, *Introductory guide to methods for selected ecological studies in marine reserves*, páginas 57–62. GIS Posidonie publications, Marseille, 2000.
- J. Martín, J.C. Braga, Ch. Betzler y Th. Brachert. Sedimentary model and high-frequency cyclicity in a Mediterranean shallow-shelf temperate-carbonate environment (uppermost Myocene, Agua Amarga Basin, Southern Spain). *Sedimentology*, 43:263–277, 1996.
- M.L. Martínez, A. Intralawana, G. Vázquez, O. Pérez-Maqueoa, P. Suttond y R. Landgraved. The coasts of our world: Ecological, economic and social importance. *Ecological Economics*, 63:254–272, 2007.

- L.A. Mayer. Frontiers in seafloor mapping and visualization. *Marine Geophysical Researches*, 27, 2006.
- E. McCarthy y B. Sabol. Acoustic Characterization of Submerged Aquatic Vegetation: Military and Environmental Monitoring Applications. En *Oceans 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition 3*, páginas 1957–1961, Providence, RI, USA, 2000.
- M.L. McIntyre, D.F. Naar, K.L. Carder, B.T. Donahue y D.J. Mallinson. Coastal bathymetry from hyperspectral remote sensing data: comparisons with high resolution multibeam bathymetry. *Marine Geophysical Researches*, 27: 129–136, 2006.
- J.E. McRea, H.G. Greene, V.M. O'Connell y W.W. Wakefiel. Mapping marine habitats with high resolution sidescan sonar. *Oceanologica Acta*, 22:679–686, 1999.
- H. Medwin. *From ocean acoustics to acoustical oceanography*. Cambridge University Press, Cambridge, 2005.
- A. Meinesz, J.M. Astier y J.R. Lefèvre. Impact de l'aménagement du domaine maritime sur l'étage infralittoral du Var, France (Méditerranée occidentale). *Annales de l'Institut Oceanographique, Paris*, 57:65–77, 1981.
- F. Mélin, G. Zibordi y J.F. Berthon. Assessment of satellite ocean color products at a coastal site. *Remote Sensing of Environment*, 110:192–215, 2007.
- E. Méndez, A. Cabello, J. Frieyro, A. Hayas, L. Granado, G. Montoya, I. Pino y J.A. Domínguez. Development of a methodology for the characterization of seagrass on the Andalusian coast using remote sensing techniques with hyperspectral sensors. *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, 36:73–83, 2012. ISSN 1988-8740.
- V. Merwade. Effect of spatial trends on interpolation of river bathymetry. *Journal of Hydrology*, 371:169–181, 2009.
- T.H. Meyer. The Discontinuous Nature of Kriging Interpolation for Digital Terrain Modeling. *Cartography and Geographic Information Science*, 31: 209–216, 2004.
- K. Minami, H. Yasuma, N. Tojo, S. Fukui, Y. Ito, T. Nobetsu y K. Miyashita. Estimation of kelp forest, *Laminaria* spp., distributions in coastal waters of

- the Shiretoko Peninsula, Hokkaido, Japan, using echosounder and geostatistical analysis. *Fisheries Science*, 76:729–736, 2010. ISSN 0919-9268.
- S.P. Miner. Application of acoustic hydrosurvey technology to the mapping of eelgrass (*Zostera marina*) distribution in Humboldt Bay, California, coastal zone '93. En *Proceedings of the 8th Symposium on Coastal and Ocean Management*, New Orleans, Louisiana, 1993.
- D. Moreno y J. Guirado. Nuevos datos sobre la distribución de las fanerógamas marinas en las provincias de Almería y Granada (SE España). *Acta Botanica Malacitana*, 28:105–120, 2003. ISSN 0210-9506.
- L. Morris y D. Ball. Habitat suitability modeling of economically important fish species with commercial fisheries data. *ICES Journal of Marine Science*, 63:1590–1603, 2006.
- M. Moszynski, A. Stepnowski y Bikonis K. 3d visualization of marine organism distribution and movement in water column using virtual reality techniques. *Journal of the Acoustical Society of America*, 114:2301–2301, 2003.
- R.P. Moyer, B. Riegl, K. Banks y R.E. Dodge. Assessing the accuracy of acoustic seabed classification for mapping coral reef environments in South Florida (Broward County, USA). *Revista de Biología Tropical*, 53:175–184, 2005.
- S. Negahdaripour y H. Madjidi. Stereovision imaging on submersible platforms for 3-D mapping of benthic habitats and sea-floor structures. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 28:625–650, 2003.
- A. Newton y J. Icely. Land Ocean Interactions in the Coastal Zone, LOICZ: Lessons from Banda Aceh, Atlantis, and Canute. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77:181–184, 2008. Introduction to the Special Issue.
- J.W. Nicholson. *Registration and Variability of SideScanSonar Imagery*. Tesis doctoral, United States Naval Academy, 1981.
- H. Nonn. *Les régions cotières de la Galice (Espagne). Etude géomorphologique*. Paris, 1966.
- L. Nykjaer. Mediterranean Sea surface warming 1985–2006. *Climate Research*, 39:11–17, 2009.
- J. Ojeda Zújar. *Las costas*. Ariel, Barcelona, 2003.

- A. Orłowski. Application of multiple echoes energy measurements for evaluation of sea bottom type. *Oceanologia*, 19:61–78, 1984.
- A. Orłowski. Acoustic methods applied to fish environmental studies in the Baltic Sea. *Fisheries Research*, 24:227–237, 1998.
- A. Orłowski. Acoustic Transects as Units for Classifying the Benthic Habitat. *Acta Acustica united with Acustica*, 95:620–627, 2009.
- J.A. Ott y L. Maurer. Strategies of energy transfer from marine macrophytes to consumer levels: The *Posidonia oceanica* example. En B.F. Keegan, P.O. Ceidigh y P.J.S. Boaden, editores, *Biology of benthic organisms*, páginas 493–502. Pergamon Press, Oxford, 1977.
- I. Parnum, J. Siwabessy, A. Gavrilov y M. Parsons. A comparison of single beam and multibeam sonar systems in seafloor habitat mapping. En *Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results, 3rd International Conference and Exhibition*, páginas 155–162, Nafplion, Greece, June 2008.
- V. Pasqualini, C. Pergent-Martini, P. Clabaut y G. Pergent. Mapping of *Posidonia oceanica* using aerial photographs and side scan sonar: Application off the island of Corsica (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47(3):359–367, 1998.
- V. Pasqualini, P. Clabaut, G. Pergent, L. Benyoussef y C. Pergent-Martini. Contribution of side scan sonar to the management of Mediterranean littoral ecosystems. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2):367–378, 2000.
- V. Pasqualini, C. Pergent-Martini, P. Clabaut, H. Marteel y G. Pergent. Integration of Aerial Remote Sensing, Photogrammetry, and GIS Technologies in Seagrass Mapping. *Photogrammetric engineering & Remote sensing*, 69(1):99–105, 2001.
- M. Paul, A. Lefebvre, E. Manca y C. Amos. An acoustic method for the remote measurement of seagrass metrics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93:68–79, 2011.
- A. Peirano, V. Damasso, M.C. Montefalcone, C. Morri y C.N. Bianchi. Growth of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile in Liguria (NW Italy, Mediterranean Sea): relations with climate, alien species invasion and anthropogenic impacts. *Marine Pollution Bulletin*, 50:817–822, 2005.

- G. Peirson y P.A. Frear. Fixed location hydroacoustic monitoring of fish populations in the tidal River Hull, north-east England, in relation to water quality. *Fisheries Management and Ecology*, 10:1–12, 2003.
- J. Perez-Cirera. Notas sobre la vegetación ficológica bentónica de la Ría de Cedeira (NO. de España). *Anales del Instituto Botánico Cavanilles*, 32:161–171, 1975.
- L. Piazzzi, S. Acunto y F. Cinelli. Mapping of *Posidonia oceanica* beds around Elba Island (western Mediterranean) with integration of direct and indirect methods. *Oceanologica acta*, 23:339–346, 2000.
- R.A. Pickrill y B.J. Todd. The multiple roles of acoustic mapping in integrated ocean management, Canadian Atlantic continental margin. *Ocean & Coastal Management*, 46:601–614, 2003.
- N.G. Plant, K.T. Holland y J.A. Puleo. Analysis of the scale of errors in nearshore bathymetric data. *Marine Geology*, 191:71–86, 2002.
- PNUD. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Informe técnico, Naciones Unidas, New York, 2005.
- D.A. Pollard. A review of ecological studies on seagrass-fish communities, with particular reference to recent studies in Australia. *Aquatic Botany*, 18:3–42, 1984.
- M. Poti, B. Kinlan y C. Menza. *Bathymetry*, capítulo 2. NOAA Technical Memorandum, 2012.
- E. Pouliquen. Depth dependence correction for normal incidence echosounding. En *Proceedings of the 7th. European Conference on Underwater Acoustics*, Delft, Netherlands, 2004.
- E. Pouliquen y X. Lurton. Identification de la nature du fond de la mer à l'aide de signaux d'écho-sounders. En *Journal de Physique IV, Deuxième Congrès Français d'Acoustique*, volumen 2, 1992.
- E. Pouliquen, O. Bergem y N. Pace. Time-evolution modeling of seafloor scatter. I. Concept. *Journal of Acoustical Society of America*, 105:3136–3141, 1999.

- B.T. Prager, D.A. Caughey y R.H. Poeckert. Bottom classification: operational results from QTC VIEW. En *Proceedings of the OCEANS '95. MTS/IEEE. Challenges of Our Changing Global Environment.*, volumen 3, páginas 1827–1835, 1995.
- J.M. Preston, A.C. Christney, S.F. Bloomer y I.L. Beaudet. Seabed Classification of Multibeam Sonar Images. En *OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition*, volumen 4, 2001.
- D.T. Pugh. *Tides, surges and mean sea-level*. John Wiley and Sons, New York, 1987.
- V. Quintino, R. Freitas, R. Mamede, F. Ricardo, A. M. Rodrigues, J. Mota, A. Perez-Ruzafa y C. Marcos. Remote sensing of underwater vegetation using single-beam acoustics. *ICES Journal of Marine Science*, 67:594–605, 2010.
- N.A. Raineault, A.C. Trembanis y D.C. Miller. Mapping Benthic Habitats in Delaware Bay and the Coastal Atlantic: Acoustic Techniques Provide Greater Coverage and High Resolution in Complex, Shallow-Water Environments. *Estuaries and Coasts*, 2011.
- M.P. Rainey, A.N. Tyler, D.J. Gilvear, R.G. Bryant y P. McDonald. Mapping intertidal estuarine sediment grain size distributions through airborne remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 86:480–490, 2003.
- S. Reed, Y. Petillot y J. Bell. An automatic approach to the detection and extraction of mine features in sidescan sonar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 28:90–105, 2003.
- D.G. Reid y C.D. Maravelias. Relationships between herring school distribution and seabed substrate derived from RoxAnn. *ICES Journal of Marine Science*, 58:1161–1173, 2001.
- A. Reinart y T. Kutser. Comparison of different satellite sensors in detecting cyanobacterial bloom events in the Baltic Sea. *Remote Sensing of Environment*, 102:74–85, 2006.
- J. Rey Salgado. *Relación morfosedimentaria entre la plataforma continental de Galicia y las Rías Bajas y su evolución durante el Cuaternario*. Publicaciones especiales Instituto Español de Oceanografía, Málaga, 1993.

- B. Riegl, R. Moyer, L. Morris, R. Virnstein y R. Dodge. Determination of the distribution of shallow-water seagrass and drift algae communities with acoustic seafloor discrimination. *International Journal of Tropical biology*, 53(1):165–174, 2005.
- I. Rodríguez, I. Montoya, M.J. Sánchez y F. Carreño. Geographic Information Systems applied to Integrated Coastal Zone Management. *Geomorphology*, 107:100–105, 2009.
- P.A. Rona. The changing vision of marine minerals. *Oregeology reviews*, 33: 618–666, 2008.
- L.G. Rudstam, S. Hansson, T. Lindem y D.W. Einhouse. Comparison of target strength distributions and fish densities obtained with split and single beam echo sounders. *Fisheries Research*, 42:207–214, 1999.
- A. Ruíz-Verdú, J.A. Domínguez-Gómez y R. Peña-Martínez. Use of CHRIS for monitoring water quality in Rosarito reservoir. En *Proceedings of the 3rd ESA CHRIS/Proba Workshop*, 2005.
- B. Sabol y J. Burczynski. Digital echo sounder system for characterizing vegetation in shallow-water environments. En A. A. Alippi y G.B. Cannelli, editores, *Proceedings 4th European Conference on Underwater Acoustics*, páginas 165–171, Rome, 1998.
- B. Sabol, R. Melton, R. Chamberlain, P. Doering y K. Haunert. Evaluation of a Digital Echo Sounder System for Detection of Submersed Aquatic Vegetation. *Estuaries and coasts*, 25(1):133–141, 2002.
- N. Sánchez-Carnero, C. Bernárdez, M. Moszynski y J. Freire. Development of an Open Source Software to Transform Acoustic Data for Classification of Benthic Habitats. *Hydroacoustics*, 10:169–174, 2007.
- N. Sánchez-Carnero, E. Couñago, D. Rodríguez-Pérez y J. Freire. Exploiting oceanographic satellite data to study the small scale coastal dynamics in a NE Atlantic open embayment. *Journal of Marine Systems*, 87:123–132, 2011.
- J.L. Sánchez-Lizaso. *Estudio de la pradera de Posidonia oceanica (L.) Delile en la Reserva Marina de Tabarca (Alicante): Fenología y producción primaria*. Tesis doctoral, Universidad de Alicante, 1993.

- J.L. Sánchez-Lizaso, J.E. Guillén y A.A. Ramos-Esplá. *The regression of Posidonia oceanica meadows in El Campello (SE Iberian Peninsula)*, volumen 32 of *Rapport Commission International Mer Méditerranée*. 1990.
- Y. Satyanarayana, S. Naithani y R. Anu. Seafloor sediment classification from single beam echo sounder data using LVQ network. *Marine Geophysical Research*, 28:95–99, 2007.
- M. Scardi, L. Chessa, E. Fresi, A. Pais y S. Serra. Optimizing interpolation of shoot density data from a Posidonia oceanica seagrass bed. *Marine Ecology*, 27:339–349, 2006.
- M.E. Schaepman, S.L. Ustin, A.J. Plaza, T.H. Painter, J. Verrelst y S. Liang. Earth system science related imaging spectroscopy-An assessment. *Remote Sensing of Environment*, 113:S123–S137, 2007.
- A.C.G. Schimel, T.R. Healy, D. Johnson y D. Immenga. Quantitative experimental comparison of single-beam, sidescan, and multibeam benthic habitat maps. *ICES Journal of Marine Science*, 67:1766–1779, 2010.
- F. Schmidt y A. Persson. Comparison of DEM Data Capture and Topographic Wetness Indices. *Precision Agriculture*, 4:179–192, 2003.
- N. Serpetti, M. Heath, E. Armstrong y U. Witte. Blending single beam RoxAnn and multi-beam swath QTC hydro-acoustic discrimination techniques for the Stonehaven area, Scotland, UK. *Journal of Sea Research*, 65:442–455, 2011.
- P.A. Siljeström, J. Rey y A. Moren. Characterization of phanerogam communities (Posidonia oceanica and Cymodocea nodosa) using side-scan-sonar images. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 51:308–315, 1996.
- E.J. Simmonds y D.N. MacLennan. *Fisheries acoustics*. Blackwell Publishing, Oxford, 2nd edition, 2005.
- D. Simons, M. Snellen y K. Siemes. The potential of inverting geotechnical and geo-acoustic sediment parameters from single-beam echo sounder returns. En *Proceedings of the Underwater Acoustic Measurements Conference*, 2009.
- J. Siwabessy, J. Penrose, R. Kloser y D. Fox. Seabed Habitat Classification. En *Proceedings of Shallow Survey'99 - International Conference en High Resolution Surveys in Shallow Water.*, 1999.

- C. Small y R.J. Nicholls. A Global Analysis of Human Settlement in Coastal Zones. *Journal of Coastal Research*, 19:584–599, 2003.
- T.J. Smyth, P.I. Miller, S.B. Groom y S.J. Lavender. Remote sensing of sea surface temperature and chlorophyll during Lagrangian experiments at the Iberian margin. *Progress In Oceanography*, 51:269–281, 2001.
- M. Snellen, D.G. Simmons y R. Riethmueller. High frequency scattering measurements for mussel bed characterization. En *Proceedings of Acoustics 2008*, páginas 5251–5256, Paris, 2008.
- M. Snellen, K. Siemes y D.G. Simons. Model-based sediment classification using single-beam echosounder signals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 129:2878–2888, 2011.
- H.U. Solanki, R.M. Dwivedi, S.R. Nayak, V.S. Somvanshi, D.K. Gulati y S.K. Pattnayak. Fishery forecast using OCM chlorophyll concentration and AVHRR SST: validation results off Gujarat coast, India. *International Journal of Remote Sensing*, 24:3691–3699, 2003.
- J. D. Spratt. The distribution and density of eelgrass, *Zostera marina*, in Tomales Bay, California. *California Fish and Game*, 75:204–212, 1989.
- R.D Stanley, R. Kieser, K. Cooke, M. Surry y B. Mose. Estimation of a widow rockfish (*Sebastes entomelas*) shoal off British Columbia, Canada as a joint exercise between stock assessment staff and the fishing industry. *ICES Journal of Marine Science*, 57:1035–1049, 2000.
- D. Sterling. *A Comparison of Spatial Interpolation Techniques For Determining Shoaling Rates of The Atlantic Ocean Channel*. Tesis doctoral, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- D.D. Sternlicht y C.P. de Moustlier. Time-dependent seafloor acoustic backscatter (10-100 kHz). *Journal of the Acoustical Society of America*, 114:2709–2725, 2003.
- W.K. Stewart, M. Jiang y M. Marra. A neural network approach to classification of sidescan sonar imagery from a midocean ridge area. *Journal of Oceanic Engineering*, 19(2):214–223, 1994.
- K. Stocks, G. Boehlert y J. Dower. Towards an international field program on seamounts within the Census of Marine Life. *Archive of Fishery and Marine Research*, 51:320–327, 2004.

- J. Strong y M. Service. Using Optimum Allocation Analysis to Improve Seed Mussel Stock Assessments. *Journal of Shellfish Research*, 30:1–6, 2011.
- J. Sutherland, D. Walstra, T. Chester, L. van Rijn y H. Southgate. Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth. *Coastal Engineering*, 51:119–142, 2004.
- P.G.V. Szalay y R.A. McConnaughey. The effect of slope and vessel speed on the performance of a single beam, acoustic classification system. *Fisheries Research*, 54:181–194, 2002.
- J. Tegowski, N. Gorska y Z. Klusek. Statistical analysis of acoustic echoes from underwater meadows in the eutrophic Puck Bay (southern Baltic Sea). *Aquatic Living Resources*, 16:215–221, 2003.
- J. Templado. Las comunidades de fanerógamas marinas en el Mediterráneo occidental. En *Actas de la VII Aula de Ecología: La gestión de los espacios marinos en el Mediterráneo*, páginas 29–37. Ed. Instituto de Estudios Almerienses. Diputación Provincial de Almería, 1995.
- M. Terán, L. Solé Sabarís y J. Vilá Valentí. *Geografía General de España*. Ariel Geografía, Barcelona, 1986.
- G.L. Thomas, S.L. Thiesfeld, S.A. Bonar, R.N. Crittenden y G.B. Pauley. Estimation of Submergent Plant Bed Biovolume using Acoustic Range Information. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 47:805–812, 1990.
- A.G. Thomson, R.M. Fuller, T.H. Sparks, M.G. Yates y J.A. Eastwood. Ground and airborne radiometry over intertidal surfaces: Waveband selection for cover classification. *International Journal of Remote Sensing*, 19:1189–1205, 1998.
- S.A. Thorpe y A.J. Hall. The characteristics of breaking waves, bubble clouds, and near-surface currents observed using side-scan sonar. *Continental Shelf Research*, 1:353–384, 2003.
- P. Tortell. Coastal zone sensitivity mapping and its role in marine environmental management. *Marine Pollution Bulletin*, 25:88–93, 1992.
- V.M. Trenkel, C. R.I.C. Francis, P. Lorance, S. Mahévas, M.J. Rochet y D.M. Tracey. Availability of deep-water fish to trawling and visual observation

- from a remotely operated vehicle (ROV). *Marine Ecology Progress*, 284: 293–303, 2004.
- Y-T. Tseng. *Recognition and assessment of seafloor vegetation using a single beam echosounder*. Tesis doctoral, Curtin University of Technology, 2009.
- R.K. Turner. Integrating natural and socio-economic science in coastal management. *Journal of Marine Systems*, 25:447–460, 2000.
- R.C. Tyce. Deep sea floor mapping systems-A review. *Marine Technology Society Journal*, 20:4–16, 1996.
- J. Urick. *Principles of underwater sound for engineers*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1975.
- R.D. Valley, M.T. Drake y C.S. Anderson. Evaluation of alternative interpolation techniques for the mapping of remotely-sensed submersed vegetation abundance. *Aquatic Botany*, 81:13–25, 2005.
- H. Van Rein, C. Brown, R. Quinn, J. Breen y D. Schoeman. An evaluation of acoustic seabed classification techniques for marine biotope monitoring over broad-scales ($>1 \text{ km}^2$) and meso-scales (10 m^2 – 1 km^2). *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 93:336–349, 2011.
- L. van Rijn, D. Walstra, B. Grasmeijer, J. Sutherland, S. Pan y J. Sierra. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. *Coastal Engineering*, 47:295–327, 2003.
- P.A. vanWalree, J. Tegowski, C. Laban y D.G. Simons. Acoustic seafloor discrimination with echo shape parameters: A comparison with the ground truth. *Continental Shelf Research*, 25:2273–2293, 2005.
- P. Verísimo Amor, D. Fernández Vidal, A. Tubío Gómez y E. Couñago Sánchez. Caracterización de la reserva marina de interés pesquero Ría de Cedeira,. Informe técnico, Fismare, Innovación para la Sostenibilidad, A Coruña, 2011.
- F. Vilas, A.M. Bernabeu y G. Méndez. Sediment distribution pattern in the Rias Baixas (NW Spain): main facies and hydrodynamic dependence. *Journal of Marine Systems*, 54:261–276, 2005.

- C. Vis, C. Hudon y R. Carignan. An evaluation of approaches used to determine the distribution and biomass of emergent and submerged aquatic macrophytes over large spatial scales. *Aquatic Botany*, 77:187–201, 2003.
- G. Voulgaris y M.B. Collins. USP RoxAnn ground discrimination system: a preliminary evaluation. Informe técnico, University of Southampton, 1990.
- P. Wadhams. The underside of Arctic sea ice imaged by sidescan sonar. *Nature*, 333:161–164, 1988.
- L.M. Wedding, A.M. Friedlander, M. McGranaghan, R.S. Yost y M.E. Monaco. Using bathymetric LiDAR to define nearshore benthic habitat complexity: Implications for management of reef fish assemblages in Hawaii. *Remote Sensing of the Environment*, 112:4159–4165, 2008.
- C. White, D. Hiranandani, C.S. Olstad, K. Buhagiar, T. Gambin y C.M. Clark. The Malta cistern mapping project: Underwater robot mapping and localization within ancient tunnel systems. *Journal of Field Robotics*, 27:399–411, 2010.
- D.J. Wildish, G.B. Fader, P. Lawton y A. MacDonals. The acoustic detection and characteristics of sublittoral bivalve reefs in the Bay of Fundy. *Continental Shelf Research*, 18:105–113, 1998.
- P. Wilson y K. Dunton. Laboratory investigation of the acoustic response of seagrass tissue in the frequency band 0.5–2.5 kHz. *Journal of Acoustical Society of America*, 125:1951–1959, 2009.
- C.D. Woodroffe. *Coasts, Form, Process and Evolution*. Cambridge, R.U., Cambridge, 2003.
- A.J. Woods, J.W. Philbeck y J.V. Danoff. The various perceptions of distance: An alternative view of how effort affects distance judgments. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35:1104–1117, 2009.
- J. Xu, Y.S. Wang, J. Yin y J. Lin. New series of corers for taking undisturbed vertical samples of soft bottom sediments. *Marine Environmental Research*, 71:312–316, 2011.
- M. Yasué, L. Kaufman y A.C.J. Vincent. Assessing ecological changes in and around marine reserves using community perceptions and biological surveys. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems*, 20:407–418, 2010.

- S. Ye, E. A. Laws, S. Zhong, X. Ding y S. Pang. Sequestration of metals through association with pyrite in subtidal sediments of the Nanpaishui Estuary on the Western Bank of the Bohai Sea, China. *Marine Pollution Bulletin*, 62: 934–941, 2011.
- N. Zaragoza, N. Sánchez-Carnero, V. Espinosa y J. Freire. Acoustic techniques for solenoid bivalve mapping. En *Proceedings of the European Conference on Underwater Acoustics*, volumen 1, páginas 139–144, 2010.
- W. Zhu, M. Zhu, X. Liu, F. Pan, X. Zhang, Y. Wang y C. Wang. High resolution bathymetric sidescan sonar. En *OCEANS '02 MTS/IEEE*, volumen 1, páginas 223–227, 2002.

Apéndices

Tabla de símbolos

Símbolo	Significado	Definido en:
f	Frecuencia de una onda	Eq. 1.1
P	Periodo de una onda	Eq. 1.1
λ	Longitud de onda	Eq. 1.1
v	Velocidad de propagación de la onda	Eq. 1.1
I_i	Intensidad en el frente de onda a una distancia r_i de la fuente de sonido	Eq. 1.2, Eq. 1.4
I_0	Intensidad en el frente de onda a una distancia de referencia, r_0	Eq. 1.2, Eq. 1.4
r_i	Distancia a la fuente de sonido	Eq. 1.2, Eq. 1.4
r_0	Distancia de referencia a la fuente de sonido	Eq. 1.2, Eq. 1.4
I_{ref}	Intensidad de referencia para el cálculo de lo dB	Eq. 1.3
β	Coefficiente de absorción, medido en dB/km	Eq. 1.5, Eq. 1.4
α_w	Coefficiente de absorción medido en metros inversos (m^{-1})	Eq. 1.5, Eq. 1.6, Eq. 3
T	Temperatura de la columna de agua, medida en $^{\circ}C$	Eq. 1.6, Eq. 1.7, Eq. 1.8

Símbolo	Significado	Definido en:
pH	Medida de acidez de la columna de agua (potencial de hidrógeno)	Eq. 1.6
r_α	Profundidad del agua a la que se calcula el coeficiente de absorción α (tiene en cuenta la presión hidrostática)	Eq. 1.6
S	Salinidad en la columna de agua, medida en gramos por litro	Eq. 1.6, Eq. 1.7
f_1, f_2	Frecuencias de absorción características de la relajación química en el agua de mar	Eq. 1.6
EL	Nivel de energía recibido por un transductor (medido en dB)	Eq. 1.9
SL	Nivel de energía de la fuente de sonido (medido en dB)	Eq. 1.9
TL	Pérdida de energía debida a la propagación de la onda (medida en dB), incluye las pérdidas por atenuación geométrica o spreading y la atenuación (<i>transmission loss</i>).	Eq. 1.9, Eq. 1.10, Eq. 1.11
TS	Medida relativa de la intensidad con la que una onda es reflejada en una determinada superficie (<i>target strength</i>).	Eq. 1.15, Eq. 1.16
I_i	Intensidad de la onda incidente en una superficie	Eq. 1.16
I_{bs}	Intensidad de la onda reflejada en una superficie	Eq. 1.16
n	Índice de refracción de un medio	Eq. 1.12, Eq. 1.13, Eq. 1.14
v_i	Velocidad de propagación de la onda (sonora) en el medio i	Eq. 1.12, Eq. 1.13
θ_c	Ángulo crítico. Ángulo a partir del cual la reflexión de una onda en un medio es total	Eq. 1.13
θ_i	Ángulo de contacto de una onda en una superficie (de incidencia, de refracción o de reflexión)	Eq. 1.14
h_1, h_2	Alturas de marea (alta y baja) del día	Eq. 2.2
t	Momento en el que fueron adquiridos los datos acústicos de un <i>ping</i> concreto.	Eq. 2.2
t_1, t_2	Horas a las que tienen lugar las mareas alta y baja del día	Eq. 2.2

Símbolo	Significado	Definido en:
$h(t)$	Corrección debida a la marea (en metros) que debe ser aplicada a un dato tomado en un tiempo t para ajustar los valores de profundidad a situación de marea baja	Eq. 2.2
H_i	Valor corregido de profundidad en una localización determinada	Eq. 2.1
H_i	Valor de profundidad adquirido con la ecosonda	Eq. 2.1
σ_{xy}	Estimación de la desviación horizontal que podría tener un <i>ping</i> debido al error del dispositivo GPS	Eq. 2.3
σ_z	Estimación de la desviación vertical que podría tener el valor de profundidad de un <i>ping</i> debido a la desviación derivada del error del dispositivo GPS y a la pendiente del terreno.	Eq. 2.4
δr	Error de posición estandar del dispositivo GPS	Eq. 2.3, Eq. 2.4
$\Delta\theta$	Ángulo formado por la dirección de avance de la embarcación en el transecto y la pendiente.	Eq. 2.3, Eq. 2.4
l	Longitud del pulso enviado por la sonda (en metros)	Cap. 3
c	Velocidad del sonido en el agua de mar	Cap. 3
τ	Duración del pulso enviado por la sonda (en segundos)	Cap. 3
δt	Duración de un <i>bin</i> (en segundos), $\delta t = \frac{1}{4}\tau$	Cap. 3
R	Profundidad a la que se detecta el fondo en un determinado <i>ping</i>	Cap. 3
R_0	Profundidad máxima seleccionada para el estiramiento de los ecos	Cap. 3
R_{ref}	Profundidad de referencia utilizada para la corrección de la duración del pulso (τ)	Cap. 3
E_1	Medida de energía contenida en el primer eco acústico. Pueden considerarse diferentes porcentajes del eco dentro de la integral ($E_{50\%}$, $E_{70\%}$, etc)	Cap. 3
E_2	Medida de energía contenida en el segundo eco acústico. Pueden considerarse diferentes porcentajes del eco dentro de la integral ($E_{50\%}$, $E_{70\%}$, etc)	Cap. 3
$G(ct/d)$	Función de dependencia de la respuesta del fondo escalada con la profundidad	Eq. 3.1
d	Profundidad a la que se encuentra un bin determinado	Eq. 3.1

Símbolo	Significado	Definido en:
$W(t)$	Función que representa la potencia emitida en un pulso emitido (elemento de estructura para la corrección PLP)	Eq. 3.1
τ_{ref}	Longitud del pulso equivalente de Pouliquen al emitido a una profundidad de referencia.	Eq. 3.1
δE_B	Estimación de la variabilidad media entre pings consecutivos de la variable E calculada para el porcentaje B de <i>bins</i> entre <i>pings</i> continuos.	Eq. 3.2
κ	Coefficiente de confusión (Cohen, 1960)	Cap. 3
r_{op}	Radio óptimo para la relación entre datos acústicos y de groundtruthing	Cap. 4
p_{ij}	Valor de la matriz de coocurrencia de la fila i y columna j	Cap. 5
At	Ángulos de la señal acústica en el eje babor-estribor (<i>athwartship</i>)	Cap. 5
Al	Ángulos de la señal acústica en el eje proa-popa (<i>alongship</i>)	Cap. 5
$H_1 \rightarrow H_{13}$	VARIABLES definidas por Haralick <i>et al.</i> (1973)	Cap. 5
α	Ángulo acústico estandarizado para un <i>bin</i> determinado	Cap. 5
ϕ	Valor del ángulo acústico correspondiente a un <i>bin</i> determinado	Cap. 5
ϕ	Valor medio del ángulo acústico en los bins de un transecto acústico correspondientes a la misma profundidad respecto al fondo	Cap. 5
σ_ϕ	Desviación típica del ángulo acústico en los bins de un transecto acústico correspondientes a la misma profundidad respecto al fondo	Cap. 5

Implementación en Octave de los métodos introducidos en la tesis

Capítulo 2

Listado 1: Corrección de marea

```
%% ECOSONS BATIMÉTRICO
%% CORRECCIÓN DE MAREA

% Realiza la corrección de marea en el valor de fondo (profundidad) de
% cada ping mediante interpolación trigonométrica de las alturas de
% marea
% cdepth=tidecorrect(sdepth, tmes, ttmes, thgts)
% sdepth: profundidad del fondo
% tmes: momento de la adquisición del ping (hora, minuto, segundo)
% ttmes: horas del día de adquisición de pleamar y bajamar (en horas
% decimales y ordenadas en orden ascendente)
% thdts: altura de marea en los momentos de pleamar y bajamar (ordenados
% acorde al ttmes)(en metros)
% Nota: requiere la introducción previa de los datos de marea manualmente
% o a través de una tabla
```

```
function cdepth=tidecorrect(sdepth, tmes, ttmes, thgts)

%Definición inicial
cdepth=sdepth;

%Extrapolación "anterior"
ii=( tmes < ttmes(1) ); % Máscara, sólo para aquellos pings en los que el
    momento de adquisición sea anterior al primer momento de bajar o
    pleamar
% La profundidad corregida se calcula como la profundidad calculada (en el
    ping) en ese momento menos la corrección de marea calculada como la
    altura del 2 momento de bajar o pleamar menos un medio de la
    amplitu de marea (thgts(2)-thgts(1)) por la oscilación definida como 1
    (que define la línea de cero o línea base) más el coseno de 2pi por el
    tiempo transcurrido entre el ping y la 1º baja- pleamar entre el
    periodo (ttmes(2)-ttmes(1))
cdepth(ii)=sdepth(ii)-(thgts(2)-0.5*(thgts(2)-thgts(1))*(1+cos(2*pi
    *(tmes(ii)-ttmes(1))/(2*(ttmes(2)-ttmes(1))))));

%Interpolación "media"
for n=1:(length(ttmes)-1) % Bucle que recorre todos las posiciones del
    vector ttmes menos la última

    ii=( ttmes(n) <= tmes ) & ( tmes<=ttmes(n+1) ); % Máscara, sólo
        para aquellos pings en los que el momento de adquisición esté entre
        dos momentos de baja- o pleamar consecutivas.
% La profundidad corregida se calcula como la profundidad calculada (en el
    ping) en ese momento menos la corrección de marea calculada como la
    altura del momento de bajar o pleamar inmediatamente posterior
    menos un medio de la amplitud de marea por la oscilación definida
    como 1 más el coseno de 2pi por el tiempo transcurrido entre el ping y
    la bajar o pleamar inmediatamente anterior entre el periodo
cdepth(ii)=sdepth(ii)-(thgts(n+1)-0.5*(thgts(n+1)-thgts(n))*(1+
    cos(2*pi*(tmes(ii)-ttmes(n))/(2*(ttmes(n+1)-ttmes(n))))));

endfor

%Interpolación "posterior"
```

```

ii=( ttmes(end) < tmes ); % Máscara, solo para aquellos pings en los que
    el momento de adquisición sea posterior al último momento de baja-
    o pleamar
% La profundidad corregida se calcula como la profundidad calculada (en el
    ping) en ese momento menos la corrección de marea calculada como la
    altura del ultimo momento de baja- o pleamar menos un medio de la
    amplitud de marea (thgts(end)-thgts(end-1)) por la oscilación
    definida como 1 más el coseno de 2pi por el tiempo transcurrido entre
    el ping y la ultima baja- pleamar entre el periodo (ttmes(end)-ttmes(
    end-1))
cdepth(ii)=sdepth(ii)-(thgts(end)-0.5*(thgts(end)-thgts(end-1))
    *(1+cos(2*pi*(tmes(ii)-ttmes(end-1)))/(2*(ttmes(end)-ttmes(end
    -1))))));

endfunction

```

Listado 2: Cálculo de la posición del fondo: método de promedio

```

%% ECOSONS BATIMÉTRICO
%% CALCULO DE FONDO: MÉTODO PROMEDIO

% Busca el primer rebote de cada ping en una matriz de ecograma (grupo de
    pings)
% hit=getFirstHit(P,Q, nearF)
% P: matriz que contiene un ping en cada fila
% Q: vector de metadatos de cada uno de los pings (hay un elemento de Q
    por cada ping de P)
% nearF: es la distancia en metros definida como "campo cercano" de la
    onda. Es igual para cada ping de P
% Nota: utiliza para realizar sumatorios la rutina "nnsun" (que permite
    realizar sumatorios ignorando valores perdidos)

function hit=getAverageHit(P,Q, nearF)

% Número de bin donde termina el nearF (donde comenzamos a trabajar)
% Calculamos este bin dividiendo el nearF por la resolución vertical (
    tamaño de bin) obtenida asumiendo en todos los pings la misma

```

```
    velocidad del sonido igual (Q(1).soundVelocity) y tiempo de muestreo (  
    Q(1).sampleInterval) del primer ping  
knf=floor( nearF/(0.5*Q(1).soundVelocity*Q(1).sampleInterval) );  
  
% Primera estimación de la localización del 1º rebote  
lgt=size(P,2); % Longitud del ping, entendida como el número de  
    columnas (bins) de la matriz P  
pP=power(10, P(:,knf:lgt)/10); % Convertir el valor de cada bin de toda  
    la matriz P a escala lineal, descartando el nearF  
hit=nan(1,size(P,1)); % Genera un vector de nan de longitud igual al  
    numero de pings  
for k=1:size(P,1) % Bucle que recorre todos los pings de la matriz P para  
    calcular el valor medio de cada distribución de energía (ping)  
  
    % Suma ponderada  
    pPkr=pP(k,:).*[1:lgt-knf+1]; % Multiplicamos cada posición de bin por  
    su correspondiente valor de intensidad, generando una nueva matriz  
    hit(k)=nnsun(pPkr)/nnsun(pP(k,:)); % Calcula el vector hit dando a  
    cada elemento del mismo el valor del sumatorio de la variable pPkr en  
    cada ping dividido por el sumatorio total de la matriz pP (nnsun lleva  
    a cabo la suma de los elementos que no son NaN)  
    if ( isnan(hit(k)) ) % Condición "de seguridad": si el valor calculado de  
        hit es igual a NaN (procedente de un ping perdido)  
        hit(k)=0; % se sustituye por un cero  
    endif  
endfor  
  
% Segunda estimación: mejora a la previa  
for k=1:size(P,1) % Bucle que recorre todos los pings de la matriz P para  
    calcular el valor medio de cada distribución de energía (ping) pero  
    solo del 1º rebote (la primera estimación incluía el ping completo).  
    lk=min(round(1.5*hit(k)), size(pP,2)); % Toma el valor mínimo entre el  
    valor del vector hit para un determinado ping por 1.5 (a medio camino  
    entre el 1º y 2º eco) y la longitud total del ping, asegurándose que  
    elimina el 2º eco.  
    llk=max(knf, floor(0.5*hit(k))); % Toma el valor máximo el punto  
    donde termina el nearF y la mitad de la columna de agua. Elimina  
    posibles errores derivados de un cálculo escaso del nearF
```

```

if ( lk>0 ) % Condicional "de seguridad": si en este ping existe rebote (
    hit()!=0), repetimos la misma rutina que en la primera aproximación
    pPkr=pP(k, 1:lk ).*[1:lk];
    hit(k)=nnsun(pPkr)/nnsun(pP(k,:));

    if ( isnan(hit(k)) )
        hit(k)=0;
    endif

endif

endfor

hit=hit+knf-1; % Para saber la posición real del fondo, sumamos al valor
    definido en el vector hit el valor del nearF sustraído anteriormente (
    knf-1)

hit=round(hit); % Se redondea el valor de hit para obtener un valor entero
    ya que los bins son unidades discretas

endfunction

```

Listado 3: Cálculo de la posición del fondo: método de umbral doble

```

%% ECOSONS BATIMÉTRICO
%% CALCULO DE FONDO: MÉTODO UMBRAL DOBLE

% Busca el primer rebote de cada ping en una matriz de ecograma (grupo de
    pings)
% hit=getFirstHit(P,Q, ndB, nndB)
% P: matriz que contiene un ping en cada fila
% Q: vector de metadatos de cada uno de los pings (hay un elemento de Q
    por cada ping de P)
% nearF: es la distancia en metros definida como "campo cercano" de la
    onda. Es igual para cada ping de P
% ndB: limite del lóbulo principal, solicitado al usuario (valor aconsejado
    ~30dB)

```

```
% nndB: limite de ruido de fondo, solicitado al usuario (valor aconsejado  
~60dB)  
% Nota utiliza para realizar sumatorios la rutina "nnsun" (que permite  
realizar sumatorios ignorando valores perdidos).
```

```
function hit=getFirstHit(P,Q,nearF, ndB, nndB)
```

```
% Número de bin donde termina el nearF (donde comenzamos a trabajar)  
% Calculamos este bin dividiendo el nearF por la resolución vertical (  
tamaño de bin) obtenida asumiendo en todos los pings la misma  
velocidad de sonido igual (Q(1).soundVelocity) y tiempo de muestreo (  
Q(1).sampleInterval) del primer ping  
knf=floor( nearF/(0.5*Q(1).soundVelocity*Q(1).sampleInterval) );  
  
pP=P(:,knf:size(P,2)); % Recorte de los pings de la matriz P eliminando el  
nearF en cada uno  
[maxP,kmax]=max(pP'); % Aplica la función "max" en la matriz pP' (  
pP traspuesta, por funcionamiento de "max"). Devuelve el valor  
máximo del ping (maxP) y la posición (nº de bin) donde está (kmax)  
hit=kmax; % Definimos el vector hit como el vector de localizaciones de  
los valores máximos (kmax)  
for p=1:size(kmax,2) % Bucle que recorre todas las posiciones del vector  
kmax (correspondientes con cada ping)  
for k=kmax(p):-1:1 % Bucle que recorre hacia atrás (la superficie) de  
uno a uno (-1), desde la posición que ocupa el máximo en el ping de  
estudio hasta el primer bin (eliminado ya el nearF).  
if ( pP(p,k) >= maxP(p)-ndB ) % Si el valor de intensidad del bin (  
del ping p, localizado en k) es mayor o igual que el máximo de ese  
pin menos ndB  
hit(p)=k; % sustituye en el vector hit la localización del máximo por  
la del bin actual (considerado como el fondo)  
elseif ( pP(p,k) < maxP(p)-nndB ) % Si el valor de intensidad del bin  
(del ping p, localizado en k) es menor que la del máximo menos  
nndB termina el bucle  
break;  
endif  
endfor  
endfor
```

```
hit=hit+knf-1; % Para saber la posición real del fondo, sumamos al valor
              % definido en el vector hit el valor del nearF sustraído anteriormente (
              % knf-1)
```

```
endfunction
```

Listado 4: Generación de archivo ASCII

```
%% ECOSONS BATIMÉTRICO
%% GENERACIÓN DE ARCHIVO ASCII

% Se genera un archivo ASCII, compatible con ESRI, a partir de una matriz
  % georreferenciada
% function img2esriascii(fn, I, x_min,x_max,y_min,y_max)
%fn: nombre del archivo ESRI-ASCII (sin extensión)
%I: matriz de datos que contiene los valores de los píxeles de la imagen
%x_min,x_max,y_min,y_max: coordenadas XY de los límites de la imagen

function img2esriascii(fn, I, x_min,x_max,y_min,y_max)

    %Información de la imagen
    height=size(I,1); % número de filas de la imagen
    width=size(I,2); % número de columnas de la imagen

    %Cabecera del archivo
    f=fopen(fn, 'w'); % Crea la variable "f" que hace referencia al archivo "
                    % fn" que se ha creado para escribir en el ('w')

    %Tamaño de píxel
    c_size=(x_max-x_min)/size(I,1); %Cálculo del tamaño de píxel como
    % la distancia total en X entre el número de filas de la imagen.

    %Metadatos '\n' denota salto de línea
    fprintf(f, "NCOLS %d\n", width); % Escribe en el archivo fn una línea
    % que comienza por "NCOLS" y a la que le sigue en formato entero (%d)
    % "width"
```

```
fprintf (f, "NROWS %d\n", height); % Escribe en el archivo fn una línea
    que comienza por "NROWS" y a la que le sigue en formato entero (%
    d) "height"
fprintf (f, "XLLCENTER %0.6f\n", x_min); % Escribe en el archivo fn
    una línea que comienza por "XLLCENTER" seguido por "x_min" con
    6 decimales (%0.6f)
fprintf (f, "YLLCENTER %0.6f\n", y_min); % Escribe en el archivo fn
    una línea que comienza por "YLLCENTER" seguido por "y_min" con
    6 decimales (%0.6f)
fprintf (f, "CELLSIZE %0.6f\n", c_size); % Escribe en el archivo fn una
    línea que comienza por "CELLSIZE" seguido por "c_size" con 6
    decimales (%0.6f)
fprintf (f, "NODATA_VALUE %d\n", -9999); % Escribe en el archivo fn
    una línea que comienza por "NODATA_VALUE" seguido por
    "-9999" en formato entero (%d)

%Datos de la imagen
for n=1:height % Bucle que recorre las diferentes filas de la imagen
    fprintf (f, " %g", I(n,:)); % Graba en cada fila los valores de esa fila
        dentro de la matriz I, en fomato de coma flotante (%g)
    fprintf (f, "\n"); % Salta de línea
endfor

fclose (f); % Cierra el archivo.

endfunction
```

Capítulo 3

Listado 5: Corrección temporal

```

%% ECOSONS CLASIFICACIÓN DE HÁBITATS BENTÓNICOS
%% CORRECCIÓN DE TIEMPO (time adjustment)

%function [PP,PP2]=pingStretch(P,R,Rmx, R2)
%P: vector de bins (dB) de un ping leído desde el archivo .raw
%R: posición del fondo para el ping medido en bins
%Rmx: posición máxima del fondo en el área de estudio (definida por el
      usuario), medida en bins
%PP: vector de bins corregidos (dB) para el 1º eco
%PP2: vector de bins corregidos (dB) para el 2º eco

function [PP,PP2]=pingStretch(P,R,Rmx, R2) % actúa ping a ping, no
      sobre la matriz de pings completa

PP=nan(1,Rmx); % Se genera un vector "PP" (para el 1º eco)
      inicializado en NaN de tamaño igual a la longitud del eco de la
      profundidad máxima ("Rmx")
PP2=nan(1,Rmx); % Se genera un vector "PP2" (para el 2º eco)
      inicializado en NaN de tamaño igual a la longitud del eco de la
      profundidad máxima ("Rmx")
L=R-2; % Se define la longitud del eco "L" medida en bins como la
      posición del fondo menos 2 bins

% Corrección del primer eco
if ( R>4 ) % Si se detectó fondo para este ping (teniendo en cuenta el
      campo cercano)

ll=min(L, size(P,2)-L); % Se calcula el valor mínimo entre la longitud
      del eco y el número de bins que quedan por debajo de R (para
      comprobar que podemos tomar para el análisis los bins
      correspondientes al tramo de R a R+L)
if (ll>1) % Si tenemos más de un bin (medida de seguridad)

```

```
PP=interp1([0:l], P(R:R+l), L/(Rmx-1)*[0:Rmx-1], 'linear'); %  
    Calculamos el nuevo ping como resultado de interpolar linealmente  
    los valores de los bins del pings original (2 a 2) hasta obtener un  
    número de bins igual al correspondiente a un ping de profundidad  
    Rmx  
  
endif  
  
% Corrección del segundo eco  
if ( exist ('R2') && R2>R+4 ) % Si existe 2º eco en el ping y este tiene  
    fondo localizado (mayor a 4 bins)  
  
    ll=min(L, size(P,2)-R2); % Se repite el proceso anterior  
    if (ll>1)  
  
        PP2=interp1([0:ll], P(R2:R2+ll), L/(Rmx-1)*[0:Rmx-1], 'linear');  
  
    endif  
  
endif %Se pudo corregir el segundo eco  
  
endif %Se pudo corregir el primer eco  
  
endfunction
```

Listado 6: Corrección de la longitud del ping

%% ECOSONS CLASIFICACIÓN DE HÁBITATS BENTÓNICOS
%% CORRECCIÓN DE ENERGÍA Y LONGITUD DEL PULSO

```
% function PPP=pingCorrect(PP,d,d0,dmx, alpha)  
%PP: vector de bins (dB) de un ping leído desde la salida de la corrección  
    de tiempo (time adjustment)  
%d: valor de profundidad para el ping  
%d0: valor de profundidad de referencia (definida por el usuario como la  
    menor profundidad a la que se va a trabajar)  
%dmx: profundidad máxima en el área de estudio (definida por el usuario)  
%PPP: vector de bins corregidos (dB)
```

```

function PPP=pingCorrect(PP,d,d0,dmx, alpha) % actúa ping a ping,
    no sobre la matriz de pings completa

% Corrección de energía "power adjustment"
if ( d>=d0 ) % Si la profundidad del ping es mayor que la profundidad de
    referencia, se puede corregir

if ( exist('alpha') ) % Si el usuario ha proporcionado un valor de "alpha"
    "
    PPP=PP+30*log10(d/d0)+2*alpha*(d*(1+[0:length(PP)-1]/dmx)-
        d0); % El valor de cada bin se corrige con la razón "30*log10(d/d0)
        +2*alpha*prof"
else
    PPP=PP+30*log10(d/d0); % Si no se ha proporcionado el valor de "
        alpha" se aplica la corrección sin este factor
endif

% Corrección de la longitud del pulso
if (dmx>d && d>d0) % Si la profundidad del ping es mayor que d0 y
    menor que dmx

    lp=4*dmx/d; % Se define el número de bins en la representación
        ajustada que corresponde a una longitud de pulso (originalmente
        cada pulso contiene 4 bins)
    lp0=4*dmx/d0; % Se define el número de bins en la representación
        ajustada que corresponde a una longitud de pulso para la
        profundidad de referencia
    dlp=1+(lp0-lp); % Se define la diferencia entre ambos valores (lp0 y lp)
        y se le suma 1 para poder convolucionar (cuando la diferencia es
        =0 debe convolucionarse con una máscara de tamaño 1)
    ckern=[ones(1,floor(dlp)), dlp-floor(dlp)]; % Se define la máscara de
        convolución (ckern) como un vector fila de tantos unos como parte
        entera tenga "dlp", seguidos por la parte fraccionario (p.ej: 5,3=
        [1,1,1,1,0.3])

    PPP=10*log10( conv( power(10, 0.1*PPP), ckern)/sum(ckern) ); %
        Se realiza la convolución en escala lineal (no en dB) del vector de

```

```
    intensidades con la máscara "ckern" normalizada (dividida por su
    suma para conservar la energía)
    PPP=PPP(1:length(PP)); % Se construye el vector PPP con los
    valores corregidos. Se recorta al mismo valor de bins que la original
    para eliminar la cola generada por la convolución

endif

else

    PPP=nan(size(PP)); % Cuando la profundidad del ping es menor que la
    de referencia (d0) no se puede realizar la corrección

endif

endfunction
```

Capítulo 4

Listado 7: Cálculo de altura de fanerógamas y de la energía dispersada por ellas

```
%% ECOSONS CARTOGRAFÍA FANERÓGAMAS
%% CARGA EFECTIVA DE LOS DATOS ACÚSTICOS Y DE POSICIÓN
    EN MEMORIA
%% CÁLCULO DE LA ALTURA DE LAS ESTRUCTURAS SOBRE EL
    FONDO

% A partir de los valores energéticos del ecograma se detecta el fondo y
    las estructuras situadas sobre él, y se calcula la altura y energía de
    estas estructuras.
% opt_coords: opción de tipo de coordenadas seleccionada por el usuario (1:
    latitud, longitud; 2: coordenadas UTM)
% opt_nearf: Campo próximo del transductor de SSS estimado (en metros).
    Valor por defecto, 2.0 m
```

```

% opt_btnTh: Umbral definido por el usuario (en dB) para la detección de
% fondo, medido desde el valor máximo de intensidad del ping. Valor por
% defecto, 30 dB
% opt_maxdepth: Profundidad máxima definida por el usuario (en metros).
% Valor por defecto, 50 m
% opt_maxvegh: Altura máxima de la vegetación definida por el usuario (en
% metros). Valor por defecto, 1.2 m
% opt_leavg: Radio de la ventana de pings que se usa para calcular el
% nivel de intensidad de fondo de la columna de agua. Valor por defecto,
% 10 pings.
% opt_vegTh: Umbral de detección de la vegetación por encima del nivel de
% la columna de agua

% dfiles: lista que contiene los nombres de los archivos seleccionados para
% procesar.

if ( length(dfiles)==0 ) % Si no hay archivos seleccionados no continuar.
break;
endif

RESULTS={}; % Inicializa los "resultados" a un contenedor vacío.

for n=1:length(dfiles) % Bucle que recorre los archivos .raw cargados de
1 a 1

% Cargar los datos
fname=dfiles{n} % Genera una variable que tome como valor el
nombre de cada uno de los archivos
mname=strrep(dfiles{n}, '.raw', '.mat'); % Genera una variable que
toma como valor el nombre de cada uno de los archivos
reemplazando la cadena ".raw" por ".mat" (un archivo en formato
de Octave que se lee más rápido)
if ( length(glob(mname))>0 ) % Si existe el fichero ".mat" buscado (el
listado de ficheros con el nombre buscado contiene al menos uno)
load(mname, "P", "Q", "G"); % Carga del archivo con nombre "
mname" y las matrices "P" (matriz que contiene un ping en cada
fila), "Q" (vector de metadatos de cada uno de los pings), y "G" (
que contiene la información del GPS: altitud, longitud y tiempo en

```

```
    horas decimales)
else % Si no existe el archivo ".mat" buscado (el listado de ficheros
    con el nombre buscado está vacío)
disp(' ... '); % muestra un mensaje de espera mientras se carga el
    fichero ".raw" en memoria
[P,Q,G]=rawsonar2m(fname, 1); % Llama a la rutina "rawsonar2m"
    para que lea el primer canal del archivo ".raw". Esta rutina genera
    las matrices "P", "Q" y "G" (ver más arriba). Se conviene que la
    señal de sónar de barrido lateral es dirigida por el GPT al primer
    canal
disp(' ... '); % Muestra un mensaje de espera mientras se guardan las
    matrices en un archivo ".mat"
save(mname, "P", "Q", "G"); % Guarda las matrices en el archivo ".
    mat"
disp(' ... '); % Muestra un mensaje de espera mientras se comprueba
    que se han guardado correctamente las matrices
load(mname, "P", "Q", "G"); % Vuelve a cargar las matrices desde el
    archivo ".mat" guardado. Esta operación se puede omitir (se realiza
    para comprobar que el guardado fue correcto)
endif

% Leer y guardar las coordenadas en forma de vectores a partir de las
    estructuras en la matriz G
lat=[]; % Se crea un vector vacío para la latitud
lon=[]; % Se crea un vector vacío para la longitud
for p=1:length(G) % Bucle que va desde 1 hasta la longitud de G, es
    decir, ping a ping.
if ( G(p).time>0 ) % Si la matriz G para ese ping tiene valor de hora
    !=0, es que tiene dato de GPS
    lat(p)=G(p).latitude; % El valor de la variable "lat" para este ping
        será el de latitud en G para este ping
    lon(p)=G(p).longitude; % El valor de la variable "lon" para este
        ping será el de longitud en G para este ping
else % Si no hay datos del GPS, las variables "lat" y "lon" tendrán
    valor "NaN" en estos pings
    lat(p)=NaN;
    lon(p)=NaN;
endif
endfor
```

```

% Conversión de coordenadas
if ( opt_coords==2 ) % Si el usuario ha seleccionado la opción de
    trabajar con coordenadas UTM
    [utmX,utmY]=latlon2utmxy(opt_utmzn, lat, lon); % Calcula las
        coordenadas UTM con la rutina "latlon2utmxy"
else % Si esta opción no fué solicitada genera las variable utmX y
    utmY como listas vacías
    utmX=[];
    utmY=[];
endif

% Definimos la resolución vertical
bscl=0.5*Q(1).sampleInterval*1500; % Calculamos el ancho de bin "
    bscl" (resolución vertical)
R0=floor(opt_nearf/bscl); % Definimos el número de bins que
    debemos eliminar como campo cercano, redondeamos al entero
    inferior el cociente del campo cercano entre el ancho de bin (en
    metros)

% Localización del valor máximo de energía de cada ping
[Pmx,Rmx]=max(P(:,R0:end)'); % Busca y guarda la posición del
    valor máximo para cada uno de los pings de la matriz P dentro de
    cada uno de sus valores de energía desde que termina el campo
    cercano "R0" hasta el final del ping

Rmx=Rmx+R0-1; % Recalcula la posición del máximo de energía
    como la posición previa (calculada sin "R0") más el campo cercano
    menos 1, para obtener la posición real dentro del ping

% Recortes de fondo
Rmx(Rmx>opt_maxdepth/bscl | Rmx<=R0+1)=NaN; % Si el
    valor máximo se encuentra más profundo que la profundidad
    máxima definida por el usuario o es inferior al campo cercano, se
    sustituye el valor por un NaN

% Detección del fondo en cada ping
Rbt=Rmx; % La posición del fondo se buscará partiendo del valor de

```

```

    la posición del valor máximo de cada ping
for p=1:size(P,1) % Bucle que recorre la matriz P ping a ping
while( Rbt(p)>R0 && P(p,Rbt(p))>=Pmx(p)-opt_btnTh ) %
    Siempre que la posición en la que se evalúa si se ha alcanzado el
    fondo esté más profunda que el campo cercano y que la potencia
    recibida ahí sea superior a la del máximo menos el umbral
    seleccionado por el usuario
    Rbt(p)=Rbt(p)-1; % Avanzar el valor de la posición de búsqueda
    del fondo
endwhile
endfor

Rbt(isnan(Rmx) | Rbt<=R0+1)=NaN; % Si la posición obtenida del
    valor máximo no era válida (es NaN) o la búsqueda del fondo ha
    entrado en en campo cercano, asignar NaN a la posición del fondo

% Profundidad en metros
depth=bscl*(Rbt-3); % Se calcula la profundidad (en metros) como el
    ancho del bin "bscl" por el bin de fondo detectado (menos 3 bins,
    por la forma en que el GPT empieza a contar los bins desde la
    emisión del pulso)

% Nivel de energía de la columna de agua
wch=2*floor(opt_maxvegh/bscl); % Se calcula el número de bins
    correspondiente a la altura máxima de la vegetación y se multiplica
    por 2.
wcl=[]; % Se inicializa la lista de valores de nivel de columna de
    agua que se calcularán para todos los pings de la matriz P
for p=1:size(P,1) % Bucle que recorre todos los pings de uno en uno
wcp=P( max(1,p-opt_levavg):min(size(P,1),p+opt_levavg),... %
    Se seleccionan los bins en los pings vecinos (opt_levavg antes y
    opt_levavg después del ping)
    max(1,Rbt(p)-wch):Rbt(p)-1 ); % y en la columna de agua
    desde el fondo hasta 2 veces la máxima altura esperada de
    la vegetación
if ( length(wcp)>0 ) % si se han seleccionado bins con esas
    condiciones (siempre se debería)
wcl(p)=mean( wcp(:) ); % calcular el nivel de la columna de agua
    como el valor medio

```



```

else
    wcl(p)=Pmx(p); % si no, asignar al valor de la columna de agua el
                valor del máximo del ping
endif
endfor

% Alineación del fondo
PPdh=floor(opt_maxvegh/bscl); % Se calcula el número de bins
    correspondiente a la altura máxima de la vegetación
PP=NaN*zeros(size(P,1), PPdh); % Se genera una matriz de NaN de
    n° de filas igual a las filas de P (n° máximo de bins) y n° de
    columnas igual a PPdh. En ella se guardarán los bins
    correspondientes a la zona en la que se detectará la vegetación
for p=1:size(P,1) % Bucle que recorre todos los pings de uno en uno
    if ( ~isnan(Rbt(p)) ) % Si se pudo calcular la posición del fondo en un
        ping
        PP(p,:)=P(p,Rbt(p)-PPdh:Rbt(p)-1); % Guardar en la matriz
            PP los valores de sus bins en la zona donde habría vegetación
            sobre el fondo
        endif
    endfor

% Suavizado de los pings
PP=conv2(ones(3,1)/3,PP)(2:end-1,:); % Suavizado (mediante
    convolución "conv2") de los valores de los bins dentro de cada ping
    en la zona con vegetación. Sustituye el valor de cada bin por el
    promedio de los valores de los bins en los pings vecinos (anterior
    y posterior) y el mismo.

% Aplicar un umbral ping a ping
for p=1:size(PP,1) % Bucle que recorre todos los pings (n° de filas) de
    la matriz "PP"
    PP(p,PP(p,:)<wcl(p)+opt_vegTh)=wcl(p); % Para cada bin (en
        cada ping), si el valor de energía del bin no es mayor al nivel de la
        columna de agua correspondiente a ese ping más un valor de
        seguridad ("opt_vegTh"), se sustituye por el valor de la columna
        de agua.
    endfor

```

```
% Cálculo de la altura de la vegetación
dRvg=size(PP,2)*ones(1,size(PP,1)); % Se define una matriz fila de
    unos ("dRvg") con tantos valores como pings tiene la matriz "PP",
    con el valor igual al número de bins de cada ping. Esta matriz
    guardará los datos de altura de la vegetación para cada ping
for p=1:size(PP,1) % Bucle que recorre todos los pings de "PP"
    if ( ~isnan(Rbt(p)) ) % Siempre que se pudiese calcular la posición del
        fondo en un ping
        while( dRvg(p)>0 && PP(p,dRvg(p))>wcl(p) ) % Si el valor de
            dRvg es mayor que 0 (es decir, el ping tiene bins) y además el
            valor del bin es mayor al nivel de la columna de agua
            dRvg(p)=dRvg(p)-1; % Resto uno al valor de dRvg, es decir,
                nuevo un bin hacia arriba el valor de posición de la vegetación
        endwhile
    endif
endfor

% Corrección de las alturas de vegetación máximas
dRvg(dRvg<=1)=NaN; % Si en la matriz que guarda la altura de la
    vegetación "dRvg" hay algún valor igual a 1 (algún ping donde se
    localiza vegetación hasta el máximo definido) entonces este valor se
    sustituye por un NaN (se supone un error de medida)

% Cálculo de altura en metros
dHvg=bscl*(PPdh-dRvg); % Se calcula en metros la altura de
    vegetación definida en "dRvg" (número máximo posible de bins
    correspondientes a la vegetación menos dRvg, por el ancho del bin)

% Guardar el resultado de los cálculos anteriores para el raw "n" en la
    base de datos
RESULTS{n}.lat=lat; % Guardar en memoria la variable "lat" en la
    base de datos "RESULTS", raw "n", campo "lat"
RESULTS{n}.lon=lon; % Guardar en memoria la variable "lon" en la
    base de datos "RESULTS", raw "n", campo "lon"
RESULTS{n}.utmX=utmX; % Guardar en memoria la variable "
    utmX" en la base de datos "RESULTS", raw "n", campo "utmX"
RESULTS{n}.utmY=utmY; % Guardar en memoria la variable "
    utmY" en la base de datos "RESULTS", raw "n", campo "utmY"
```

```

RESULTS{n}.depth=depth; % Guardar en memoria la variable "
    depth" en la base de datos "RESULTS", raw "n", campo "depth"
RESULTS{n}.PP=PP; % Guardar en memoria la variable "PP" (
    ecograma recortado y ajustado en el fondo) en la base de datos "
    RESULTS", raw "n", campo "PP"
RESULTS{n}.dHvg=dHvg; % Guardar en memoria la variable "
    dHvg" (altura de la vegetación) en la base de datos "RESULTS",
    raw "n", campo "dHvg"

endfor

```

Capítulo 5

Listado 8: Cálculo de la parte del ecograma correspondiente al volumen de fondo insonificado

```

%% ECOSONS SPLITTEX
%% RECORTE DEL ÁREA DE ESTUDIO POR DEBAJO DEL FONDO

% A partir de los datos leídos de un archivo .raw de una ecosonda de haz
% partido, se calculan tres matrices (de intensidad y angulares)
% correspondientes al área de interés bajo el fondo
% function [I,Al,At]=bottomthick(thickness, sdata)
% thickness: espesor del área seleccionada por debajo del fondo
% sdata: estructura de datos procedente del archivo .raw generado por la
% ecosonda
% I: intensidad de la señal en dB para cada bin en cada ping
% Al: valor angular del ángulo "alongship" de cada bin en cada ping
% At: valor angular del ángulo "athwarthship" de cada bin en cada ping

function [I,Al,At]=bottomthick(thickness, sdata)

% Definición del campo cercano
r=0.1/2; % Se define el radio del transductor (se asumió un diámetro de
    10 cm)

```

```
N=pi*(r**2)*sdata.frequency/sdata.soundvelocity; % Se define el
    campo cercano "N" a partir de los parámetros de adquisición
dR=0.5*sdata.soundvelocity*sdata.sampleinterval; % Se define el
    ancho del bin en metros
N1=round(N/dR); % Se calcula el número de bins que corresponden al
    campo cercano

% Detección del fondo
[xmax, xpos]=max( sdata.power(N1:end, :) ); % El vector 'xmax'
    guarda el valor máximo de cada ping (columna) (a partir del campo
    cercano) y 'xpos' la posición (número de bin) donde se ubica
xpos=xpos+N1-1; % Para localizar el bin máximo en la totalidad del
    ping se añade, a la ubicación anterior, los bins correspondientes al
    campo cercano

bpos=xpos-1; % Definimos inicialmente la posición del fondo "bpos"
    como la de un bin anterior al máximo
for i=1:size(sdata.power,2) % Bucle que recorre cada ping (columna)
    while( bpos(i)>N1 && sdata.power(bpos(i), i)>sdata.power(xpos(i),
        i)-30 ) % Siempre que el bin no pertenezca al campo cercano y que
        el valor de energía de ese bin sea mayor al valor máximo del ping -30
        dB
        bpos(i)=bpos(i)-1; % La posición del fondo continúa buscándose hacia
        la superficie
    endwhile % Cuando no sea así, se toma esa como la posición del fondo
endfor

% Recortamos y almacenamos el área de interés por debajo del fondo
Nthick=round(thickness/dR); % Número de bins que corresponden al
    área de interés

for i=1:size(sdata.power,2) % Bucle que recorre los pings uno a uno
    I(:,i)=sdata.power( (bpos(i)):(bpos(i)+Nthick), i ); % Recorte de los
        valores de intensidad del archivo .raw dentro del área de interés
    AI(:,i)=sdata.alongship_mek( (bpos(i)):(bpos(i)+Nthick), i ); %
        Recorte de los valores angulares (alongship) del archivo .raw dentro
        del área de interés
    At(:,i)=sdata.athwartship_mek( (bpos(i)):(bpos(i)+Nthick), i ); %
        Recorte de los valores angulares (athwartship) del archivo .raw dentro
```

```

        del área de interés
    endfor

endfunction

```

Listado 9: Cálculo de la matriz de coocurrencia

```

%% ECOSONS SPLITTEX
%% CÁLCULO DE LA MATRIZ DE COOCURRENCIA

% A partir de una matriz de ángulos cuantizada (procedente de un ecograma
% de sonda de haz partido) se calcula su matriz de coocurrencia
% function c=coocur2(a,as, d)
% a: matriz de ángulos cuantizada
% as: vector con los valores de cuantización (valores consecutivos)
% d: dirección de la textura (1:horizontal, 2: vertical , 3:ambas direcciones)

function c=coocur2(a,as, d)

c=zeros(max(as)-min(as)+1); % Se genera una matriz cuadrada del
    mismo orden que el número de valores en ("as")
da=1-min(as); % Valor de desplazamiento que se aplica a la matriz "a" si
    sus valores de cuantización no comienzan en 1.
[lh,lw]=size(a); % Tamaño de la matriz "a"

switch(d) % Según la dirección "d" escogida se realiza el cálculo de un
    modo o de otro (hay tres casos)

case 1 %Texturas horizontales (busca el valor de la matriz en un punto y
    el siguiente en la misma fila)

for i=1:lh % Bucle que recorre las filas de la matriz "a"
for j=1:lw % Bucle que recorre las columnas de la matriz "a"

a0=da+a(i,j); % Calcula la fila de la matriz de coocurrencia en la que
    se va a añadir el par de píxeles actual (1 seguido de 4, por
    ejemplo)

```

```
    a1=da+a(i,j+(j<lw)); % Calcula la columna de la matriz de
        coocurrencia siempre que no desborde la matriz (condición
        establecida mediante (j<lw))

    c(a0,a1)=c(a0,a1)+(1); % Sumamos "un par" en las coordenadas
        de la matriz de coocurrencia

endfor
endifor

case 2 %Texturas verticales (busca el valor de la matriz en un punto y el
        siguiente en la misma columna)

for i=1:lh % Bucle que recorre las filas de la matriz "a"
for j=1:lw % Bucle que recorre las columnas de la matriz "a"

    a0=da+a(i,j); % Calcula la fila de la matriz de coocurrencia en la que
        se va a añadir el par de píxeles actual
    a2=da+a(i+(i<lh),j); % Calcula la columna de la matriz de
        coocurrencia siempre que no desborde la matriz (condición
        establecida mediante (i<lh))

    c(a0,a2)=c(a0,a2)+(1); % Sumamos "un par" en las coordenadas
        de la matriz de coocurrencia

endfor
endifor

otherwise % Texturas en tres direcciones (horizontal, vertical y diagonal
        principal)

for i=1:lh % Bucle que recorre las filas de la matriz "a"
for j=1:lw % Bucle que recorre las columnas de la matriz "a"

    a0=da+a(i,j); % Calcula la fila de la matriz de coocurrencia en la
        que se va a añadir el par de píxeles actual
    a1=da+a(i,j+(j<lw)); % Calcula la columna de la matriz de
        coocurrencia siempre que no desborde la matriz (condición
        establecida mediante (j<lw))
```

```

a2=da+a(i+(i<lh),j); % Calcula la columna de la matriz de
coocurrencia siempre que no desborde la matriz (condición
establecida mediante (i<lh))
a3=da+a(i+(i<lh),j+(j<lw)); % Calcula la columna de la matriz de
coocurrencia (siguiendo la diagonal) siempre que no desborde la
matriz

c(a0,a1)=c(a0,a1)+(j<lw); % Sumamos "un par" en las coordenadas
de la matriz de coocurrencia
c(a0,a2)=c(a0,a2)+(i<lh); % Sumamos "un par" en las coordenadas
de la matriz de coocurrencia
c(a0,a3)=c(a0,a3)+(j<lw)*(i<lh); % Sumamos "un par" en las
coordenadas de la matriz de coocurrencia

endfor
endfor

endswitch

% Devolver la matriz simetrizada (para tener en cuenta los pares de
valores en ambos órdenes); para no contar los pares de ángulos iguales
dos veces, se resta la diagonal
c=c+c'-diag( diag(c) );

endfunction

```

Listado 10: Cálculo de variables de Haralick

```

%% ECOSONS SPLITTEX
%% CÁLCULO DE LAS VARIABLES DE HARALICK (1973)

% A partir de una matriz de coocurrencia se calculan las variables de
haralick en cada ping
% function h=haralick2( C )
% C: matriz de coocurrencia

function h=haralick2( C )

```

```
R=sum(C(:)); % Se calcula la suma total de todos los elementos de la
matriz "C"
Ng=size(C,1); % Número de filas de la matriz (igual al número de
columnas y de variables)
p=C/R; % Se calculan las probabilidades dividiendo cada uno de los
valores de la matriz "C" entre "R"
px=sum(p); % Se calcula la suma de las filas de la matriz p (columnas en
p): probabilidades marginales
py=sum(p); % Se calcula la suma de las columnas de la matriz p:
probabilidades marginales

% Siguiendo la metodología definida en Haralick (1973) se calculan 2
vectores que resumen:
% En el PRIMER CASO el sumatorio de los valores de la matriz "a"
localizados dentro de la matriz en posiciones cuya suma de coordenadas
coinciden ((1,3) y (2,2), por ejemplo). En este caso se obtiene un
vector de 2*Ng-1 (pxpy) valores cada uno correspondiente a la suma
de valores de las diagonales descritas en la matriz "con pendiente
positiva".
% En el SEGUNDO CASO el sumatorio de los valores de la matriz "a"
localizados en la diagonal central con pendiente negativa (el primer
término) y en las diagonales situadas a la misma distancia de la central
. En este caso se obtiene un vector de longitud Ng que en cada
posición tiene el sumatorio de los elementos de las diagonales
pareadas (a ambos lados de la central)

% PRIMER CASO
pxpy=zeros(1,2*Ng-1); % Se genera un vector de longitud igual al doble
de las filas de la matriz menos 1
for k=2:(2*Ng) % Bucle que toma los valores entre 2 y el número de filas
de la matriz.
for i=max(1,k-Ng):min(k-1,Ng) % Bucle que toma los valores entre 1 (
o k-Ng si este es mayor) y Ng o (k-1 si este es menor)
% Con la realización de este bucle para cada k define el valor se obtiene
el valor de cada uno de los elementos del vector pxpy
pxpy(k-1)=pxpy(k-1)+p(i,k-i); % Se le suma al valor que existe en el
vector "pxpy", en la posición (k-1), el valor que ocupa en la matriz
la posición (i, k+i)
```



```

endfor
endfor

% SEGUNDO CASO
pxmy=zeros(1,Ng); % Se genera un vector de longitud igual al número de
    filas de la matriz "a".
for k=0:(Ng-1) % Bucle que toma los valores entre 0 y el número de filas
    de la matriz menos 1.
    for i=(k+1):Ng % Bucle que toma los valores entre (k+1) y el número de
        filas de la matriz "a".
        pxmy(k+1)=pxmy(k+1)+p(i,i-k); % Se le suma al valor que existe en
            el vector "pxmy", en la posición (k+1), el valor que ocupa en la
            matriz la posición (i, i-k). Si k!=0 la diagonal situada a la izquierda
            de la diagonal central
    endfor
    if ( k>0 ) % Si K>0 (no estamos en la diagonal central)
        for i=max(1,1-k):(Ng-k) % Bucle que toma los valores entre 1 (o 1-k
            si es mayor) y Ng-k.
            pxmy(k+1)=pxmy(k+1)+p(i,i+k); % Se le suma al valor que existe en
                el vector "pxmy", en la posición (k+1), obtenido en el bucle previo,
                el valor que ocupa en la matriz la posición (i, i+k). La diagonal
                situada a la derecha de la diagonal central
        endfor
    endif
endfor

% Variables intermedias generadas para el cálculo de las variables de
    Haralick (definidas en Haralick, 1973)
mux=[1:Ng]*px'; % Producto escalar: vector fila, [1:Ng] * vector columna
    px' (suma de las filas de la matriz).
muy=[1:Ng]*py'; % Producto escalar: vector fila, [1:Ng] * vector columna
    py' (suma de las columnas de la matriz).
sgx=sqrt( sum( power([1:Ng]-mux, 2) * px' ) ); % Se calcula la raíz
    cuadrada del sumatorio del producto de la resta del vector [1:Ng]-mux
    al cuadrado, por el vector px'
sgy=sqrt( sum( power([1:Ng]-muy, 2) * py' ) ); % Se calcula la raíz
    cuadrada del sumatorio del producto de la resta del vector [1:Ng]-muy
    al cuadrado, por el vector py'

```

% Cálculo de las variables de Haralick

% H1: Energía o segundo momento angular

h1=sum(power(**p**(:),2)); % Sumatorio de los cuadrados de todos los
valores de la matriz "p"

% H2: Contraste

h2=**pxmy***power([0:**Ng**-1],2); % Producto (escalar) del vector **pxmy** por
el cuadrado del vector traspuesto [0:**Ng**-1]'

% H3: Correlación

h3=sum(sum(([1:**Ng**]'*[1:**Ng**] - **mux*****muy**).* **p**/(**sgx*****sgy**))); %
Sumatorio de todos los productos de los numeros de fila por los
numeros de columna menos el producto de las dos medias, ponderadas
con los valores de "p" en la respectiva fila y columna, y normalizado
por el producto de "sgx" por "sgy"

% H4: Varianza

h4=**px***power([1:**Ng**]'-**mux**, 2); % Producto (escalar) del vector "px" por
el cuadrado de la diferencia de [1:**Ng**]-**mux** traspuesta

% H5: Momento inverso de las diferencias

h5=sum(sum(**p** ./ (1 + power([1:**Ng**]***ones**(1,**Ng**) - **ones**(**Ng**,1)*[1:**Ng**,
2)))); % Suma ponderada con las probabilidades "p" de los inversos
de las diferencias entre los respectivos numeros de fila y columna (más
uno)

% H6: Suma de la media

h6=**pxpy***[2:2***Ng**]; % Producto (escalar) del vector "pxpy" (vector fila) y
el vector [2:2***Ng**] (vector fila también, por lo que se traspone)

% H7: Suma de la varianza

h7=**pxpy***power([2:2***Ng**]'-**h6**, 2); % Producto (escalar) del vector "
pxpy" por el cuadrado de la diferencia entre el vector [2:2***Ng**] (
traspuesto) y la sexta variable de Haralick (**H6**)

% H8: Suma de la entropía

h8=-**pxpy**(**pxpy**>0)*log(**pxpy**(**pxpy**>0)'); % Producto (escalar) del
vector "pxpy" por su logaritmo (siempre que los valores de "pxpy" sean

```

>0)

% H9: Entropía
h9=-p(p(:)>0)' * log(p(p(:)>0)); % Producto (escalar) de los elementos
    de la matriz "p" por sus logaritmos (siempre que los valores sean >0)

% H10: Diferencia de la varianza
h10m=pxmy*[0:Ng-1]'; % Producto (escalar) del vector "pxmy" y el
    vector [0:Ng-1]
h10=pxmy*power([0:Ng-1]'-h10m, 2); % Producto (escalar) del vector
    "pxmy" por el cuadrado de la diferencia entre el vector [0:Ng-1] y el
    valor "h10m"

% H11: Diferencia de Entropía
h11=-pxmy(pxmy>0)*log( pxmy(pxmy>0)' ); % Producto (escalar) del
    vector "pxmy" por su logaritmo (siempre que los valores sean >0)

% H12: Entropía relativa normalizada
hxy0=h9; % Entropía
hxy1=-sum( sum( p .* log( px' * py + 1e-15 ) ) ); % Sumatorio de todos
    los productos de las probabilidades "p" por el logaritmo del producto
    de probabilidades marginales "px" y "py" correspondientes a las filas y
    columnas de "p"
hxy2=-sum( sum( (px' * py) .* log( px' * py + 1e-15 ) ) ); % Sumatorio
    de todos los productos de las probabilidades marginales "px" por "py"
    por los logaritmos de sus productos correspondientes a las filas y
    columnas de "p"
hx=px*log(px' + 1e-15); % Producto (escalar) del vector "px" por su
    logaritmo (más un valor que evite el log(0))
hy=py*log(py' + 1e-15); % Producto (escalar) del vector "py" por su
    logaritmo (más un valor que evite el log(0))
h12=( hxy0 - hxy1 )/max( [hx, hy] ); % Cociente entre la diferencia de
    los vectores "hxy0" y "hxy1" y el valor máximo de los vectores "hx" y
    "hy"

% H13: Ángulo de entropía
h13=power( 1 - exp( -2.0*( hxy2 - hxy0 ) ), 0.5); % raíz cuadrada de
    1 menos la exponencial de dos veces la diferencia entre "hxy2" y "hxy0"

```

```
"  
  
% H14: Lacunaridad  
m=mean(p(:)); % Media de los elementos de la matriz "p"  
if (m>0) % Si la media es >0  
    h14=std(p(:))/m; % Calcular la desviación estandar dividida entre la  
        media de la matriz "p"  
else  
    h14=0; % Si la media es =0 la variable H14=0  
endif  
  
h=real([ h1, h2, h3, h4, h5, h6, h7, h8, h9, h10, h11, h12, h13, h14 ]);  
    % Se genera un vector "h" de 14 valores correspondientes con la parte  
    real (por seguridad) de cada una de las variables de Haralick  
  
endfunction
```



Índice alfabético

- absorción, 23
 - coeficiente de, 23
- Análisis de Componentes Principales, 91, 139
- análisis de conglomerados, 91, 139
- ángulo crítico, 32
- archivo RAW, 58, 111
- armónico, 19
- atenuación, 79
 - geométrica, 20, 23
 - por disipación viscosa, 21
- backscattering, *véase* retrodispersión
- banda
 - ancha, 19
 - ancho de, 19
 - estrecha, 19
- batimetría, 51, 158
 - superficie batimétrica, 55
 - técnicas, 52
- bin, 79, 111
- Cabo de Gata
 - parque natural, 5, 106
- campo
 - cercano, 111
- característica textural
 - Tipo 1, 139
- clasificación de Folk, 83, 132
- cluster, *véase* análisis de conglomerados
- coeficiente kappa, 91
- convolución, 87
- corrección
 - de marea, 59
 - de energía (*power adjustment*), 86
 - de longitud de pulso (*pulse length adjustment*), 86
 - de tiempo (*time adjustment*), 86
 - manual, 62
- Cymodocea sp., 106

- decibelio, 23
 dendrograma, 139
 detección de fondo, *véase* fondo, detección
 disipación viscosa, *véase* atenuación por disipación viscosa
 eco, 28
 ataque, 28
 cola, 28
 primer, 80, 138
 segundo, 29, 80, 139
 Ecosons, 41
 batimétrico, 58
 bottom classification, 85
 seagrass, 113
 split-tex, 138
 ecuación
 del sónar, 24, 32, 79
 Ensis sp., 132
 fanerógamas, 159
 marinas, 104
 fase, 17
 filtro, 55
 de media, 117
 fondo
 clasificación, 78
 detección, 58, 85
 Fourier
 coeficiente, 59
 frecuencia, 14
 armónica, *véase* armónico
 portadora, 19
 geomorfología, 69
 GPS, 33
 error, 60
 hábitat
 bentónico, 81, 105
 hábitat bentónico, 159
 Haralick
 variable, 139, 147
 impedancia acústica, 104
 impedancia acústica, 27
 intensidad
 nivel de, 23
 interpolación, 55, 61
 IDW (ponderación de distancia inversa), 61
 KO (kriging ordinario), 61
 KU (kriging universal), 61
 RBG (base de funciones radiales), 61
 trigonométrica, 59
 kriging ordinario, 90, *véase también* interpolación, KO, 117
 ley de Snell, 27, 32
 LiDAR, 55
 lóbulo
 lateral, 79
 principal, 79
 macroalgas, 159
 máxima verosimilitud, 115
 modelo digital de elevación, 52
 Monte Carlo
 simulación, 60, 116
 movimiento
 ondulatorio, *véase* onda
 oscilatorio, 15
 periódico, 14
 multibeam, *véase* {onda multihaz}8
 navaja, *véase* *Ensis sp.*

- obstáculo, 25
- onda, 15
 - acústica, 16
 - armónica, 15
 - de sonido, 16
 - electromagnética, 15
 - esférica, 17, 25, 78
 - frecuencia, 15, 22
 - frente de, 17
 - longitud de, 15, 22
 - longitudinal, 16
 - mecánica, 15
 - paquete de, 19
 - período, 22
 - transversal, 16
- PCA, *véase* Análisis de Componentes Principales
- período, 14
- ping, 19, 78, 111
- Posidonia sp., 104
- profiler
 - Doppler, 10
 - sound, 9
 - sub-bottom, 10
- pulso
 - longitud de, 19
- QTC, 38, 159
- R (paquete estadístico), 85, 113, 139
- reflexión, 27
- refracción, 26
 - índice de, 32
- relajación química, *véase* atenuación por relajación química
- Remote Observation Vehicles, 124
- retrodispersión, 104, 130
- reverberación acústica, 111
- ría, 4
 - de Cedeira, 64, 82
 - de Pontevedra, 132
- RoxAnn, 37, 159
- sidescan sonar, *véase* sónar de barrido lateral, *véase* sónar de barrido lateral
- SIG, *véase* sistema de información geográfica
- single beam, *véase* sonda monohaz
- Sistema de Información Geográfica, 55, 85, 113
- software
 - comercial, 153
 - de código abierto, 41
 - libre, 41, 154, 156
- sónar
 - de barrido lateral, 8, 34, 55, 105
- sonda
 - acústica, 18, 34
 - batimétrica, 34
 - de haz partido, 8, 34, 131
 - monohaz, 8, 34, 55, 78, 105
 - multihaz, 8, 34, 55, 105
 - split-beam, *véase* sonda de haz partido, *véase* sonda de haz partido
- spreading, *véase* atenuación geométrica
- SSS, *véase* sónar de barrido lateral
- teledetección
 - acústica, 6
 - óptica, 6, 15
- textura, 137
 - característica, 138
- transceptor, 18
- transductor

piezoeléctrico, 17
TVU (incertidumbre vertical total),
63
zona costera, 1, 52