Introducción

Antonio Bode, Alicia Lavín y Luis Valdés

Variabilidad climática atmosférica y oceánica

El Atlántico oriental en el norte de España

La observación oceanográfica en el norte de España

Objetivo

Estrategia de muestreo

Variabilidad climática atmosférica y oceánica

Todos los ecosistemas experimentan variaciones a distintas escalas espaciales y temporales. Unos son periódicos, como los relacionados con la sucesión de las estaciones meteorológicas que afectan a las principales características ambientales (temperatura, pluviosidad, vientos, etc.) y a los ciclos de actividad de las especies (reproducción, crecimiento, etc.). Otros cambios ocurren de forma brusca o continuada a lo largo de varios años como consecuencia de modificaciones en los factores ambientales a gran escala, como ocurre con los cambios climáticos. En estos últimos los ecosistemas pueden llegar a modificarse tanto durante el cambio que terminan por transformarse completamente en otros ecosistemas diferentes. Tanto los ecosistemas terrestres como los acuáticos sufren estos procesos de cambio, pero es tal vez en los ecosistemas marinos donde la dinámica causada por los cambios es mas notoria.

El océano está en constante movimiento con corrientes superficiales y profundas que, en último término, dependen de la energía calorífica proporcionada por el sol. Estas corrientes reparten el calor por todo el planeta, siendo un regulador eficiente del clima. Además no sólo determinan el transporte de organismos por todo el océano, sino que afectan a prácticamente todos sus procesos vitales (Mann y Lazier, 1996). La producción biológica del océano se debe fundamentalmente a la fotosíntesis que realizan las microalgas planctónicas (fitoplancton) que se distribuyen por la capa superficial iluminada del océano y que necesitan disponer de un suministro adecuado de sales nutrientes, abundantes en las capas profundas del océano (Fig. 1). Este suministro se realiza lentamente por difusión o, más rápidamente, por procesos de mezcla turbulenta de aguas superficiales y profundas que ocurren a todas las escalas de espacio y tiempo, desde milésimas de milímetro a miles de kilómetros y desde fracciones de segundo a cientos de años. Un caso especialmente efectivo de fertilización de las aguas superficiales con nutrientes de las aguas profundas es el del afloramiento. Este fenómeno, que se suele producir por la influencia del viento en las costas oeste de los continentes, desplaza grandes volúmenes de agua superficial (cálida y empobrecida en nutrientes) hacia el océano y los reemplaza con aguas profundas (frías y ricas en sales nutrientes) que ascienden desde el fondo, principalmente de la plataforma continental. La turbulencia oceánica también influye en el aprovechamiento de la materia orgánica producida por el fitoplancton (producción primaria) por los organismos consumidores en las redes tróficas marinas. En éstas la transferencia de la producción primaria es realizada fundamentalmente por los consumidores planctónicos (zooplancton, Fig. 2) a su vez fuente de alimento de peces, moluscos (ej. mejillones, pulpos y calamares), reptiles (ej. tortugas), mamíferos (ej. ballenas) y aves marinas. Toda esta complejidad trófica depende en última instancia de la variedad de las interacciones entre los organismos y las distintas escalas de la turbulencia, constituyendo la característica principal de la dinámica del ecosistema oceánico.

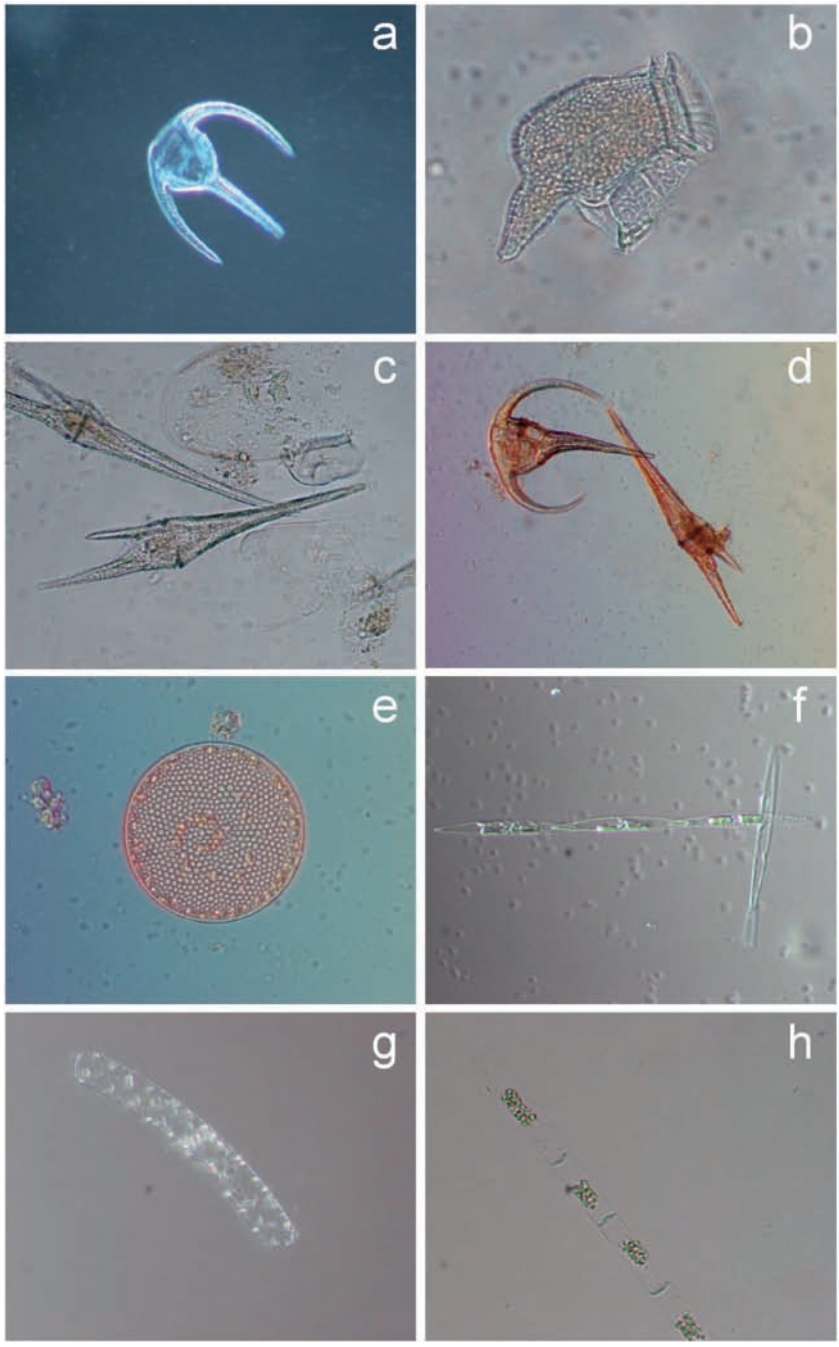


Figura 1. Ejemplos de fitoplancton del área de estudio. Dinoflagelados: Ceratium *azoricum* (a), *Dinophysis caudata* (b), *Neoceratium furca* (c) y *Neoceratium arietinum* (d). *Diatomeas: Coscinodiscus* sp. (e), *Pseudonitzschia* cf. *pungens* (f), *Guinardia striata* (g) y *Leptocilyndrus danicus* (h).

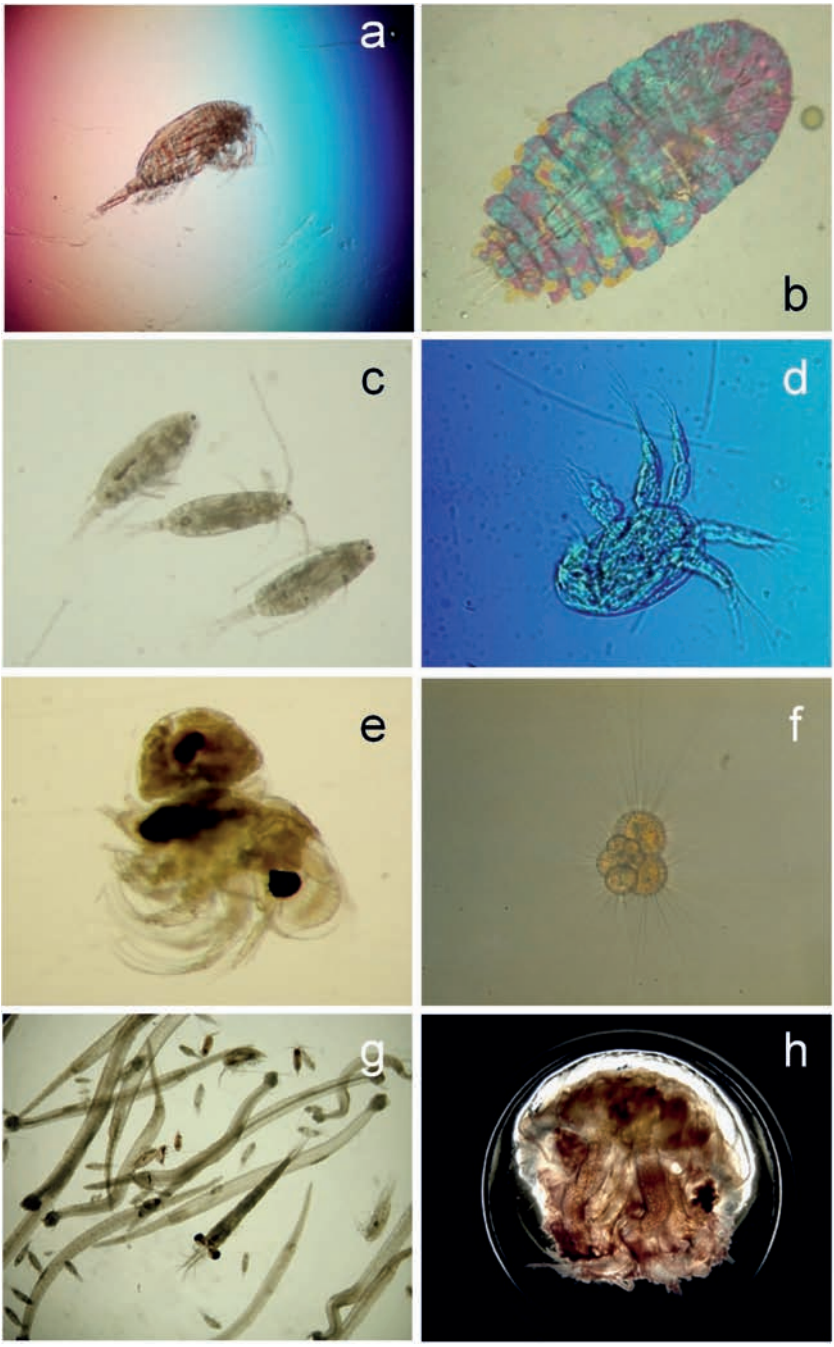


Figura 2. Ejemplos de zooplancton del área de estudio. Copépodos: *Calanus* sp. (a), *Sapphirina angusta* (b) y *Acartia clausi* (c). Larva *nauplius* (d), Cladócero: *Evadne spinifera* (e), Foraminífero (f), Quetognatos (g), Medusa: *Pelagia noctiluca* (h).

El océano ha experimentado grandes cambios en el pasado como consecuencia del clima. Los registros de restos de organismos en los sedimentos revelan la existencia de comunidades de especies muy diferentes, como las asociadas al periodo cálido registrado hace 2000 años en las costas de Galicia (Bernárdez et al., 2008). En el contexto de la evolución reciente del clima, con una marcada influencia antropogénica que se traduce fundamentalmente en un calentamiento progresivo de la atmósfera, se están registrando importantes cambios en los océanos (Nelleman et al., 2009). Además del calentamiento general en las aguas, no sólo en las más superficiales, se observa el aumento del nivel del mar, una creciente acidificación del océano por el incremento del CO_2 en la atmósfera que es absorbido por el océano y alteraciones en el régimen de vientos que afectan a los afloramientos, al oleaje y a las tormentas, entre otros procesos. Estos cambios en las propiedades físicas y químicas del océano afectan de modo directo a los ecosistemas marinos en forma de cambios en la distribución de especies, en sus ciclos reproductivos y en su abundancia numérica y biomasa. Las transformaciones afectan a todos los niveles tróficos, incluyendo los recursos pesqueros (Sherman y Hempel, 2009), de forma que resulta crucial determinar su amplitud y extensión para prever el comportamiento del océano en el futuro.

Los cambios observados, aun cuando ocurren a escala global, no se producen con la misma intensidad en todas las regiones oceánicas. Así por ejemplo, en las costas de Groenlandia y Canadá se está produciendo un enfriamiento de las aguas superficiales como consecuencia de la fusión de los hielos del Ártico, mientras que en el resto de los océanos se observa un calentamiento (Belkin, 2009). En las zonas de afloramiento se ha pronosticado un aumento de su intensidad como consecuencia de la intensificación de los vientos debido al calentamiento diferencial de los continentes y del océanos (Bakun, 1990), sin embargo este cambio sólo se ha encontrado en algunas regiones (Gregg et al., 2005) pero no en otras (Pérez et al., 2010).

Debido a la importancia económica y estratégica del océano es fundamental identificar su dinámica y variabilidad estacional y temporal y conocer sus causas y la evolución a escala regional y local. A escala mundial, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), por encargo de la Organización de las Naciones Unidas, elabora cada aproximadamente cuatro años un informe cada vez más completo sobre el estado del clima teniendo en cuenta especialmente los efectos causados por el incremento de CO_2 de origen antropogénico y sus efectos sobre distintos componentes de la atmósfera, la biosfera y geosfera, así como sobre múltiples aspectos sociales y económicos. El último de estos informes ha sido publicado en 2007 y dedica uno de sus capítulos íntegramente a la creciente aceleración de los principales cambios en el océano (IPCC, 2007a). En España también se han venido realizado evaluaciones preliminares de los efectos del cambio climático en el océano considerando todo el litoral (Anadón et al., 2005; Pérez y Boscolo, 2010) o regiones como Galicia (Xunta de Galicia, 2009) o Asturias (Anadón y Roqueñi, 2009). El Instituto Español de Oceanografía comprendió (incluso antes de la cumbre de Rio de 1992) la necesidad de disponer de una observación sistemática y continuada de nuestros ecosistemas marinos para poder conocer las causas y evolución de su variabilidad, por lo que sus series temporales han permitido hacer evaluaciones regionales.

El Atlántico oriental en el norte de España

La región del atlántico que baña las costas del norte de la Península Ibérica se caracteriza por estar en una zona de clima templado, sometida a una clara variabilidad estacional con mezcla vertical de aguas durante el invierno y una tendencia a la estratificación en las aguas superficiales durante el verano como consecuencia del calentamiento solar. La mezcla invernal promueve la renovación de los nutrientes en la superficie, agotados en el verano debido al consumo por el fitoplancton (Bode et al., 2007). No obstante esta región representa el límite norte del sistema de afloramiento del noroeste de África y la región canaria, con lo que, debido a los vientos de componente norte y nordeste en la primavera y verano se beneficia de enriquecimientos regulares de nutrientes de aguas profundas, lo cual le permite sostener elevados niveles de producción biológica (Figueiras et al., 2002). La influencia del afloramiento es mayor en la costa noroeste (Galicia) que en la norte (mar Cantábrico), por la particular morfología y orientación de la costa y la existencia de rías, que amplifican el efecto fertilizador del afloramiento (Álvarez-Salgado et al., 2000). Aún así, el afloramiento tiene un efecto notable en la parte occidental del mar Cantábrico durante el verano (Botas et al., 1990) mientras que la parte oriental del Golfo de Vizcaya presenta condiciones de estratificación superficial y menor aporte de nutrientes durante el verano (Lavín et al., 2006).

La plataforma continental en el mar Cantábrico, que constituye la parte sur del Golfo de Vizcaya, es estrecha y está surcada por diversos cañones de gran profundidad, lo que le confiere unas características peculiares entre las que destaca la intensa influencia del océano. Así se conoce el efecto de las aguas subtropicales transportadas por corrientes a lo largo del talud continental (Haynes y Barton, 1990), que aportan nutrientes pero también especies de aguas más cálidas (Fernández et al., 1991) notablemente durante el invierno. Otros fenómenos oceanográficos de importancia en la región incluyen los giros oceánicos que se acercan a la costa (Pingree, 1993) y que también influyen en la composición y producción del plancton (Fernández et al., 2004). En el extremo occidental, la costa de Galicia presenta una plataforma continental de mayor extensión en la que la interacción entre el afloramiento y la circulación de las rías, antiguos valles fluviales sumergidos que funcionan como eficientes conversores de la energía solar en biomasa aprovechable en forma de pesca y marisco (Figueiras et al. 2002), da lugar a un ecosistema singularmente rico en materia orgánica, único en Europa. Además, la transición entre las aguas afloradas del oeste y las aguas más estratificadas del Cantábrico oriental causa un importante gradiente biogeográfico que se manifiesta en muchas comunidades biológicas (ej. Fischer-Piette, 1957; Anadón y Niell, 1981; Arrontes, 2005; Valdés et al., 2007; Bañón et al., 2010).

La observación oceanográfica en el norte de España

Desde el establecimiento de los primeros laboratorios específicamente marinos en la costa se comenzaron a realizar observaciones de distintas variables de interés oceanográfico (Lavín et al., 2006). En 1886 se funda la estación Marítima de Zoología y Botánica Experimentales en Santander (Madariaga de la Campa, 1986), que después pasa a formar parte del Instituto Español de Oceanografía (IEO), y que desde entonces no ha dejado de realizar expediciones oceanográficas por el Cantábrico y otros mares, centradas fundamentalmente en la investigación pesquera. Desde 1943 el IEO mantiene los mareógrafos de Santander, A Coruña y Vigo, como parte de la Red de Estaciones Mareográficas destinadas a la elaboración de tablas de marea y a la determinación del nivel medio del mar (http://indamar.ieo.es/mareas/mareas.htm). También otros laboratorios vienen recogiendo datos oceanográficos, como la serie de observaciones de la temperatura del mar iniciada por la Sociedad Oceanográfica de Guipúzcoa (Borja et al., 2000) y de otras características físicas, químicas y del plancton en la costa vasca (ej. Revilla et al., 2010).

Las distintas observaciones, sin embargo, no fueron sistematizadas con un objetivo específicamente dedicado al estudio de la variabilidad oceánica hasta hace relativamente poco tiempo. A partir de las series locales iniciadas en los Centros Oceanográficos del IEO en Vigo, A Coruña y Santander a finales de la década de 1980 y comienzos de 1990, el IEO crea en 1993 el Programa de Obtención y Análisis de Series Temporales de Datos Oceanográficos (Valdés et al., 2002, http://www.seriestemporales-ieo.com). El objetivo es "comprender y parametrizar la respuesta del ecosistema ante las diversas fuentes de variabilidad temporal, tanto en sus características oceanográficas como en las poblaciones planctónicas, y especialmente en aquellos factores y procesos que influyen en la producción biológica y pueden alterar el ecosistema". Las series iniciales se ampliaron en 1993 a la costa asturiana con la colaboración de la Universidad de Oviedo en la serie de Cudillero y, después en 2001, con una nueva serie al crearse el Centro Oceanográfico de Gijón.

Objetivo

El objetivo de este libro es sintetizar la información recogida en los proyectos de observación oceánica del IEO en la región atlántica del norte de España y mostrar evidencias de cambios interanuales en la física, química y biología del océano en relación con factores climáticos. A partir de las tendencias observadas en las relaciones entre índices climáticos y oceanográficos, así como las predicciones de cambio a largo plazo en la región, se estiman los impactos más probables del clima en el océano futuro según los conocimientos actuales.

Este volumen continua la serie iniciada con el estudio de la influencia del cambio climático en la oceanografía física del mar Mediterráneo (Vargas Yañez et al., 2007). En esta ocasión la diversidad de información recogida, fundamentalmente derivada de los proyectos RADIALES y VACLAN y de la Red de Estaciones Mareográficas del IEO, permite hacer un estudio pormenorizado de las principales fuentes de variabilidad en los componentes físicos, biogeoquímicos y biológicos del océano en la región atlántica del norte de España. Con ello se pretende mostrar la importancia de las series de observaciones del océano a largo plazo como fuente de información básica tanto para valorar los cambios pasados como para estimar el comportamiento futuro del ecosistema oceánico en la región ante el cambio climático. A lo largo de los distintos capítulos no solo se sintetiza el conocimiento oceanográfico recogido en gran parte en diversas publicaciones científicas que han aparecido a lo largo de la vida de los proyectos, sino que además se amplían las series y los análisis con el propósito de actualizar y completar las conclusiones, especialmente sobre las tendencias y variabilidad oceánica a escalas climáticas.

En primer lugar (Capítulo 1) se analiza la variabilidad climática atmosférica reciente (desde la década de 1960) y su influencia sobre las condiciones oceanográficas de la región, especialmente en relación a la intensidad y frecuencia del afloramiento. El Capítulo 2 describe la hidrografía y dinámica física regional discutiendo su variabilidad interanual en las últimas décadas, con especial atención al calentamiento observado en las distintas capas de agua y a la intensidad de los procesos de mezcla invernal. El conocimiento de estos últimos es muy importante, ya que determina en gran medida el aporte estacional de nutrientes a la superficie y, por tanto, la producción biológica. Este capítulo también presenta un registro climatológico de circulación en aguas profundas a partir de las series de fondeos más largas existentes en la región. El Capítulo 3 se destina específicamente a describir la variabilidad y tendencias en el nivel del mar a partir de la serie de 67 años de medidas de los mareógrafos desplegados en la zona, realizando además una estimación de los niveles extremos esperados a largo plazo. En el Capítulo 4 se realiza un análisis comparativo entre Galicia y el Cantábrico de la variabilidad en los nutrientes inorgánicos en relación al clima y al afloramiento, así como la influencia de factores locales. De las concentraciones y relaciones entre los distintos compuestos de nitrógeno, fósforo y silicio se deducen los elementos limitantes en cada zona y las comunidades de

fitoplancton esperadas en distintas situaciones. Después se analizan las series de los distintos componentes del plancton en relación a los cambios observados en el clima y los factores ambientales. La composición del picoplancton (organismos unicelulares menores de 2 µm de diámetro) es analizada en el Capítulo 5. El picoplancton es un buen indicador de cambios en el ecosistema pelágico a diferentes escalas temporales por su pequeño tamaño y elevada abundancia; su estudio se ha incorporado recientemente a las series de RADIALES. El Capítulo 6 trata de la variabilidad y tendencias interanuales en la composición de las comunidades de fitoplancton, en un análisis comparativo entre dos series de Galicia y el mar Cantábrico. En este capítulo se estudian las relaciones entre las especies del fitoplancton y las variables climáticas y oceanográficas observadas en ambas zonas mientras que en el siguiente (Capítulo 7) se hace lo mismo para la biomasa y producción primaria, la base de la red trófica pelágica de la región. Finalmente en el Capítulo 8 se analiza la variabilidad en la composición del zooplancton, destacando las similaridades y diferencias en las distintas secciones. En este capítulo se presta especial atención a la presencia de organismos gelatinosos (medusas y salpas) y su relación con el clima. Con el fin de dar una mayor coherencia a la interpretación de los resultados, en los distintos capítulos se ha aplicado, con ligeras variantes, un mismo procedimiento estadístico de análisis de las series de observaciones, que se detalla en el Anexo I.

Estrategia de muestreo

El proyecto RADIALES realiza observaciones multidisciplinares (física, química y biología) *in situ* a frecuencia mensual en 5 secciones de estaciones localizadas en Vigo, A Coruña, Cudillero, Gijón y Santander (Fig. 3). Esta disposición permite recoger la variabilidad de condiciones oceanográficas y biogeográficas en un gradiente de intensidad decreciente del afloramiento de oeste a este en el sur del Golfo de Vizcaya. Además se tienen en cuenta características locales, como la diferente influencia de las rías en Vigo y A Coruña, el efecto del Cabo Peñas entre Cudillero y Gijón o la estrechez de la plataforma continental frente a Santander. En cada sección se define una estación de referencia para aguas de plataforma (en torno a los 100 m de profundidad) y otra para aguas costeras (en torno a los 20 m de profundidad) en las que se realizan observaciones hidrográficas y muestreos de agua a distintas profundidades. Estas estaciones se complementan con otras según las características de cada sección. La existencia de Centros Oceanográficos en las proximidades de estas secciones facilita la logística de muestreo mensual mediante los barcos oceanográficos costeros B/O José María Navaz, con base en Vigo, B/O Lura en A Coruña (Fig. 4) y B/O José Rioja en Santander (este último da servicio a los muestreos de Santander, Gijón y Cudillero).

Debido a las características de la plataforma continental en esta región, así como y al tipo de barcos disponibles para las observaciones, el estudio de las aguas a profundidades mayores de 100 m sólo resulta accesible en las secciones del proyecto RADIALES en Cudillero y Santander. Por ello desde 2003 se vienen realizando muestreos en una red de estaciones que incluyen tres secciones oceanográficas de entre 90 y 200 millas de extensión situadas frente a cabo Finisterre y cabo Ortegal, en Galicia, y frente a Santander en el Cantábrico. Estos muestreos se enmarcan en el Proyecto VACLAN (Variabilidad Climática en el Atlántico Norte, http://www.vaclan.ieo.es) y tienen como objetivo analizar los cambios en los flujos de calor y las propiedades físicas y biogeoquímicas de las masas de agua de las cuencas ibérica, europea y del Golfo de Vizcaya. Además de los muestreos periódicos, que se complementan con las estaciones más profundas del proyecto RADIALES en Santander, VACLAN emplea dos fondeos permanentes de sensores de corrientes marinas e instrumentación autónoma, y se completa con la información de variables meteorológicas y del agua superficial que registra la boya "Augusto González Linares" (http://www.boya_agl.st.ieo.es/boya_agl/HTML).

Los muestreos del proyecto VACLAN se realizan con frecuencia anual o semestral (invierno y verano) en una red de estaciones repartidas a lo largo del margen suroccidental del Golfo de Vizcaya (Fig. 3) empleando regularmente el buque oceanográfico B/O Cornide de Saavedra, con base en Vigo, y ocasionalmente el N/O Thalassa, con base en Nantes (Francia). Los fondeos permanentes de VACLAN disponen de correntómetros (aparatos de medida de intensidad y dirección de la corriente), así como de sensores de medida de la temperatura y salinidad

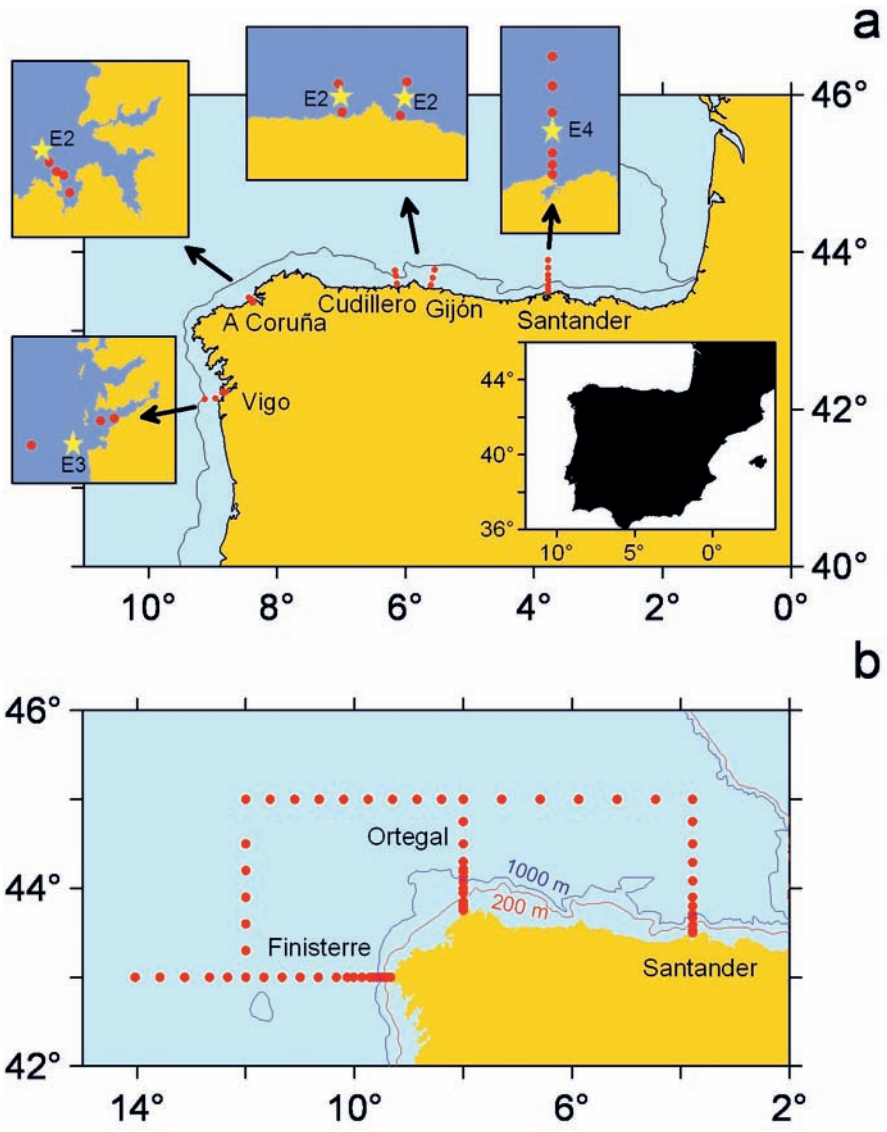


Figura 3. Localización de las estaciones de muestreo del proyecto RADIALES (a) y del proyecto VACLAN (b). Se indican con estrellas las estaciones situadas entre 80 y 150 m de profundidad de las que se han obtenido los datos analizados en la mayor parte de los capítulos de este libro. La línea continua en a señala la posición de la isobata de 200 m, límite de la plataforma continental.

del agua, desplegados a las profundidades de los núcleos de las masas de agua a estudiar, por medio de un cabo o cable anclado al fondo del mar y sostenido por boyas. La boya meteorológica registra de forma continua medidas de dirección e intensidad del viento, temperatura y humedad relativa del aire, radiación solar, temperatura y salinidad, oxígeno disuelto y fluorescencia superficial del mar, altura y dirección del oleaje y velocidad e intensidad de la corriente

hasta 100 m de profundidad. Toda esta información es transmitida en tiempo real y, una vez procesada, es almacenada para el posterior análisis de tendencias y cambios en relación a la variabilidad climática del Cantábrico.

En ambos proyectos los muestreos de la columna de agua siguen los procedimientos estandarizados por el proyecto Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS, UNESCO, 1994). Así se realizan perfiles verticales de temperatura y salinidad mediante equipos CTD (Conductivity, Temperature and Depth) y se recogen muestras de agua a profundidades estándar mediante botellas oceanográficas tipo Niskin. Desde el año 2000 el muestreo se realiza mediante una roseta de botellas oceanográficas acoplada al CTD, lo que permite disponer de las medidas *in situ* de temperatura y salinidad de las muestras de agua. El proyecto RADIALES realiza un muestreo más detallado de la capa superficial, donde se realiza la fotosíntesis, e incluye medidas de irradiancia y fluorescencia debida al fitoplancton en la mayor parte de las estaciones. De las botellas oceanográficas se recogen muestras de agua para la determinación de sales nutrientes (nitrato, nitrito, amonio, fosfato y silicato) y, en algunas estaciones, también para la determinación de oxígeno disuelto, clorofila, materia orgánica y plancton (fitoplancton, protozoos y bacterias). El zooplancton se muestrea mediante pescas con redes de plancton y se conserva en formol hasta su observación al microscopio en el laboratorio. En todos los casos los procedimientos analíticos siguen métodos reconocidos internacionalmente (UNESCO, 1994; Harris et al., 2000). En los distintos capítulos de este libro se detallan y se dan referencias específicas de los métodos empleados.



Figura 4. B/O Lura, del Centro Oceanográfico de A Coruña. Ejemplo de barco costero empleado en el proyecto RADIALES.