

**La exploración
de la biodiversidad marina**
**Desafíos científicos
y tecnológicos**

Carlos M. Duarte (ed.)

Separata del capítulo

**3. ECOSISTEMAS DE LAS PROFUNDIDADES MARINAS:
RESERVORIO PRIVILEGIADO DE LA BIODIVERSIDAD
Y DESAFÍOS TECNOLÓGICOS**

por

Eva Ramírez Llodra^{1,2} y David S. M. Billett²

1 Instituto de Ciencias del Mar (CMIMA-CSIC), Barcelona, España

2 Centro Oceanográfico Nacional (NOC), Southampton, Reino Unido

© Fundación BBVA, 2006

www.fbbva.es

ISBN: 978-84-96515-26-0



3.1. INTRODUCCIÓN

LAS PROFUNDIDADES MARINAS son el mayor ecosistema de la Tierra: cerca del 50% de la superficie de nuestro planeta se encuentra por debajo de los 3.000 m de profundidad. Además albergan uno de los mayores reservorios de biodiversidad. Pero, debido a su distancia y a los desafíos tecnológicos que supone su estudio, también constituyen uno de los ecosistemas más desconocidos. La expedición *HMS Challenger* (1872-1876) marcó el inicio de la época «heroica» en la exploración de las profundidades marinas. Desde entonces, nuestros conocimientos han evolucionado en paralelo a los avances tecnológicos.

Se considera fondo marino profundo aquel que se extiende por debajo de los aproximadamente 200 metros de profundidad del talud continental hasta las llanuras abisales (3.000-6.000 m) y las fosas marinas, como la fosa de las Marianas, donde se alcanza la mayor profundidad del planeta (11.000 m). Estos ecosistemas se caracterizan por la ausencia de luz, por un aumento de la presión directamente proporcional a la profundidad y por temperaturas bajas –salvo en algunos casos–. En las aguas marinas profundas pueden encontrarse desde hábitats inmensos, como las llanuras abisales (millones de km²) y las dorsales oceánicas (65.000 km de longitud), hasta otros accidentes geológicos y/o biológicos más pequeños, como cañones submarinos, montañas submarinas, arrecifes de coral de aguas profundas, fuentes hidrotermales y surgencias frías, donde habitan comunidades únicas de microorganismos y animales.

Para estudiar los ecosistemas de las profundidades marinas es imprescindible la utilización de la última tecnología, que nos proporciona las herramientas necesarias para la localización, la cartografía y el estudio de los diferentes hábitats y de la fauna que albergan. Estas herramientas incluyen sonares de alta resolución para cartografiar el fondo marino, sumergibles tripulados, vehículos operados por control remoto, vehículos submarinos autónomos, remolcadores de grandes profundidades, material de muestreo, sondas, instrumentos hidroacústicos y cámaras isotérmicas e isobáricas, además de técnicas de laboratorio, como las herramientas moleculares. También son cruciales las colaboraciones internacionales, para compartir equipos, experiencia y recursos.

◀ **Foto 3.1: *Anoplogaster cornuta*, pez abisal del Atlántico.** Ésta es una de las especies de peces que pueden vivir a mayor profundidad, ya que ha sido encontrada hasta los 5.000 m, aunque habitualmente ocupa fondos entre los 200 y 2.000 m. Su enorme cabeza y sus grandes dientes son características morfológicas típicas de los peces que habitan en la total oscuridad de los más profundos fondos marinos.

Las profundidades marinas esconden importantes recursos biológicos y geológicos. Por este motivo, industrias como la pesca de arrastre de profundidad o la exploración petrolífera se adentran cada vez más en zonas de aguas profundas. Los científicos están colaborando con las industrias, las agencias de conservación y los políticos con objeto de desarrollar alternativas para la promoción de la conservación y la gestión de un medio que sigue siendo uno de los grandes desconocidos de nuestro planeta.

3.2. HISTORIA DE LA EXPLORACIÓN DE LAS PROFUNDIDADES MARINAS: DE LA TEORÍA DE LA «ZONA AZOICA» DE FORBES AL DESCUBRIMIENTO DE LAS FUENTES HIDROTERMALES

Las raíces de nuestro conocimiento sobre los ecosistemas de las profundidades marinas se encuentran en las grandes expediciones del siglo XIX, posibles gracias al perfeccionamiento de la navegación y de las técnicas e instrumentos de muestreo. Entre 1841 y 1842, Edward Forbes postuló la «teoría azoica», tras observar que el número de animales en las aguas del mar Egeo disminuía a medida que aumentaba la profundidad de los dragados. La extrapolación de sus resultados le llevó a creer que no existía vida por debajo de los 600 m de profundidad. Sin embargo, las expediciones del *HMS Lightning* (1868) y el *HMS Porcupine* (1869 y 1870) en la región nordeste del Atlántico y el Mediterráneo y, en especial, la expedición del *HMS Challenger* alrededor del mundo (1872-1876) demostraron que existía vida a cualquier profundidad, desde la costa hasta las profundidades abisales (Murray y Hjort 1912). La expedición del *Challenger* es considerada hoy en día como el inicio de la oceanografía moderna.

A mediados del siglo XX, la expedición *Galathea* (1950-1952) encontró pruebas de vida marina incluso en las zonas más profundas del fondo marino, obteniendo muestras de fauna a 10.200 m en la fosa de Filipinas. La información y los datos de expediciones previas, junto con el desarrollo de métodos de muestreo nuevos y más precisos, favorecieron un cambio en la forma de llevar a cabo la investigación biológica en las profundidades marinas. A partir de mediados de los años sesenta, la biología descriptiva empezó a complementarse con biología ecológica y de procesos basada en métodos científicos rigurosos (Hessler y Sanders 1967; Grassle y Sanders 1973; Grassle 1977). Cuando las dragas del tipo *boxcorer* permitieron obtener muestras cuantitativas de la pequeña fauna de las profundidades marinas, supimos que los sedimentos de los fondos marinos profundos sustentan una gran biodiversidad, distando mucho de ser la «zona azoica» del «fondo marino azoico» que pronosticaba Forbes (Hessler y Sanders 1967). El desarrollo de instrumentos para fotografiar las aguas profundas y, más adelante, también de sumergibles capaces de bajar a grandes profundidades nos permitió observar, por primera vez en la historia, la fauna de las aguas profundas, estudiarla en su propio hábitat y disponer de información esencial que los muestreos a ciegas o a distancia no nos proporcionaban.

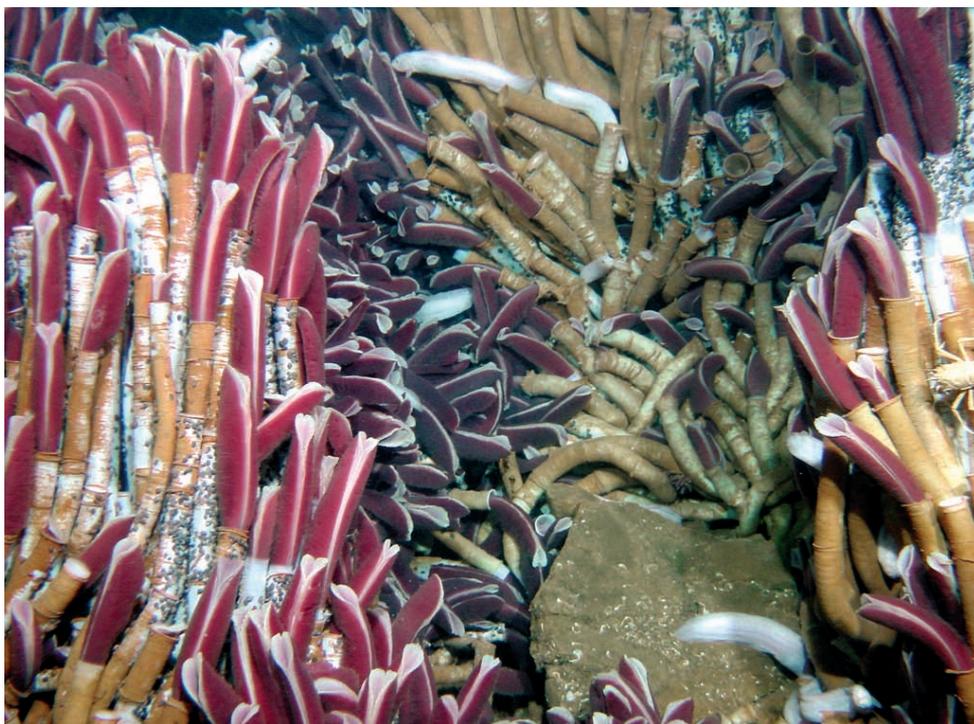


Foto 3.2: El gusano tubícola gigante *Riftia pachyptila*, de las fuentes hidrotermales del Pacífico este

Hace menos de 30 años tuvo lugar uno de los hallazgos más importantes de nuestro tiempo: el descubrimiento de las fuentes hidrotermales en la dorsal de las Galápagos en el océano Pacífico (1977), mientras se realizaban estudios geotérmicos sobre el equilibrio de los flujos térmicos (Lonsdale 1977; Corliss et al. 1979). Pero lo que los tripulantes y los científicos del sumergible norteamericano *Alvin* no esperaban encontrar era el extraordinario paisaje de fumarolas negras colonizadas por densas poblaciones de exóticos y desconocidos animales, como el gusano tubícola gigante *Riftia pachyptila* (foto 3.2).

Lo más sorprendente de todo fue descubrir que estos ecosistemas dependían de la producción primaria de bacterias quimioautotróficas que para sintetizar materia orgánica utilizan compuestos inorgánicos reducidos que fluyen del interior de la Tierra en los fluidos hidrotermales (v. apartado 3.3.2). Estos nuevos hábitats donde la vida prospera sin necesidad de energía solar son los conocidos ecosistemas quimiosintéticos. Hoy en día sabemos que otros hábitats reductores, como las surgencias frías, los restos de ballenas y zonas con mínimos de oxígeno, también albergan comunidades que dependen de la energía química, con especies y fisiología similares a las de los animales de las fuentes hidrotermales (v. apartado 3.3.2).

3.3. ECOSISTEMAS DE LAS PROFUNDIDADES MARINAS: CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES Y BIODIVERSIDAD

Los océanos cubren el 70% de la superficie de la Tierra o, dicho de otra manera, una superficie equivalente a la suma de dos veces la superficie de Marte y la Luna juntos. ¡Pero sabemos más de la geografía de la Luna o Marte que de nuestros océanos! Un porcentaje superior al 50% de la superficie de la Tierra se encuentra por debajo de los 3.000 m de profundidad, con una media de 3.800 m. Las profundidades marinas son, por lo tanto, el mayor ecosistema de nuestro planeta y uno de los menos estudiados. Comprenden gran variedad de hábitats, desde el margen inferior de la plataforma continental hasta las zonas más profundas de las fosas marinas, cada uno de los cuales tiene características físicas y geoquímicas definidas que sustentan una de las mayores biodiversidades del planeta. Según la fuente de energía utilizada por los ecosistemas marinos, los hábitats de las profundidades marinas se dividen en dos grupos principales: heterotróficos y quimiosintéticos. En los hábitats heterotróficos, las comunidades de animales dependen de la materia orgánica sintetizada en la superficie a partir de la fotosíntesis, y por ello también de la energía solar. En los hábitats quimiosintéticos, las comunidades biológicas dependen de la energía de compuestos químicos reducidos, como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) o el metano (CH_4), procedentes de las capas internas de la Tierra.

3.3.1. Ecosistemas heterotróficos

Gran parte de la vida en las aguas profundas de los océanos depende de la llegada de materia orgánica producida en las capas superficiales por fotosíntesis. Son los denominados hábitats heterotróficos, porque en ellos no hay ningún tipo de producción primaria intrínseca. En el bentos de las profundidades marinas, los ecosistemas heterotróficos se extienden desde los márgenes continentales y llanuras abisales hasta las zonas más profundas en las fosas marinas. Los márgenes continentales comprenden gran variedad de hábitats, con características físico-químicas, geológicas y biológicas definidas y específicas que trataremos a continuación.

3.3.1.1. SEDIMENTOS

Los márgenes continentales cubren el 13% de la superficie mundial de fondo marino (Wollast 2002). Constituyen el mayor reservorio de sedimentos de la Tierra, y en ellos llegan a depositarse hasta el 90% de los sedimentos procedentes de la erosión de la superficie terrestre (McCave 2002). El ecosistema de márgenes abiertos está muy influenciado por procesos dinámicos como las corrientes de agua, que afectan y dirigen el transporte de energía y materia orgánica. En algunas regiones de la costa, el viento también puede provocar movimientos ascendentes

de agua, que movilizan aguas de las capas inferiores y las elevan hacia la superficie, pobre en nutrientes, proporcionando alimentos y favoreciendo la alta productividad en la plataforma continental (Wollast 2002). En otras zonas, los desprendimientos de tierras provocan alteraciones a gran escala, capaces de destruir comunidades enteras de un solo golpe.

Las fuerzas que crean la heterogeneidad en la distribución, composición y abundancia de la fauna en los márgenes continentales son distintas según la escala espacial. A gran escala (por encima de los 1.000 km), factores físicos como la geología, la temperatura, las corrientes y las masas de agua son los más importantes. A una escala intermedia (1-100 km), la distribución de animales viene determinada por factores como el flujo descendente de materia orgánica producida en la capa fótica, la disponibilidad de oxígeno (zonas con concentraciones mínimas de oxígeno), el tipo de sedimento y los desastres naturales (Gage 2002). Por último, a pequeña escala, las interacciones biológicas son el principal motor de la distribución de la fauna. La información disponible sobre la biodiversidad y la biogeografía de la fauna en los márgenes continentales es todavía muy escasa. La biomasa de la epifauna (animales que viven sobre el sedimento) disminuye con la profundidad, mientras que en las aguas más profundas la presencia de un elevado número de animales excavadores se refleja en la aparición de hoyos y montículos. Los animales que habitan en las zonas profundas del margen continental son sobre todo detritívoros, alimentándose de la materia orgánica acumulada en el sedimento, mientras que en la franja superior del margen continental, donde las corrientes son más intensas, los animales de la megafauna y los filtradores aumentan en número. Finalmente, en el límite superior del talud continental, un incremento del tamaño del grano del sedimento comporta una disminución de la biota. Una de las observaciones más llamativas en los márgenes abiertos es el pico de biodiversidad en las zonas medias (Stuart, Rex y Etter 2003). Se desconoce el porqué de este fenómeno, pero hay varios proyectos dedicados a estudiar los factores que hacen posible tales niveles de biodiversidad (v. apartado 3.5).

3.3.1.2. CAÑONES

Los cañones submarinos son estructuras topográficas similares a los cañones en tierra, que se abren en los márgenes continentales y resultan muy característicos de los mares europeos, como el Mediterráneo catalán (mapa 3.1) y los mares del sur de Francia y Portugal.

Los cañones son puntos calientes de biodiversidad en los márgenes continentales. Por sus características morfológicas e hidrodinamismo, son zonas que favorecen el transporte de materia orgánica desde la superficie terrestre hacia el fondo marino. Los cañones contienen gran variedad de sustratos, como zonas rocosas y zonas de sedimento y arena, donde pueden encontrarse complejos ecosistemas que albergan un elevado número de especies endémicas. Constituyen asimismo un

Mapa 3.1: Mapa batimétrico de una sección del Mediterráneo occidental donde puede observarse el sistema de cañones



Fuente: www.icm.csic.es/geo/gma/MCB.

hábitat importante para especies comerciales como la gamba rosada (*Aristeus antennatus*), una de las capturas más importantes del Mediterráneo catalán (Sardà, Company y Castellón 2003). Sin embargo, la topografía irregular de los cañones y la dificultad para conseguir muestras han impedido históricamente su estudio. Ahora, las nuevas técnicas para la obtención de imágenes en aguas profundas con vehículos remolcados u operados por control remoto y sumergibles están favoreciendo la exploración y el estudio de las características geofísicas y biológicas de estas formaciones geológicas (v. apartado 3.5).

3.3.1.3. CORALES DE AGUAS PROFUNDAS

Los estudios de los márgenes continentales de la década pasada nos descubrieron la existencia de corales de aguas profundas en forma de arrecifes a lo largo de los márgenes continentales de la región nordeste y noroeste del océano Atlántico. Los arrecifes de coral del nordeste del Atlántico (foto 3.3) se encuentran aproximadamente a 1.000 m de profundidad, extendiéndose entre Noruega y Portugal, y recientemente se han descubierto ecosistemas similares en el Mediterráneo. Los



Foto 3.3: Corales de profundidad observados con el ROV francés *Victor 6000* a 1.650 m de profundidad en el Atlántico nordeste

corales de aguas profundas, como *Lophelia pertusa* y *Madrepora oculata*, forman arrecifes de carbonato que se extienden a lo largo de varios kilómetros y albergan una gran biodiversidad. Sirven de refugio, de estructura y como vivero para otras especies. Los arrecifes son complejos hábitats tridimensionales que acogen gran variedad de esponjas, corales blandos, moluscos, crustáceos y equinodermos (Freiwald 2002), además de especies comerciales. Aunque sabemos muy poco sobre la composición y el funcionamiento de estas ricas comunidades, ya existe evidencia del daño provocado por la pesca de arrastre de profundidad en zonas con corales de aguas profundas (v. apartado 3.6).

3.3.1.4. MONTAÑAS SUBMARINAS

Las montañas submarinas se caracterizan por pendientes pronunciadas, presencia de sustratos blandos y duros, gran variedad de profundidades –desde abisales hasta sublitorales– y aislamiento geográfico (Rogers 1994). Se estima que hay cerca de 100.000 montañas submarinas que superan los 1.000 m de altitud en el conjunto de océanos de la Tierra, y muchas más de menor altitud. No obstante,

únicamente se han muestreado cerca de 350, y sólo 100 se han estudiado con detalle. Las características biológicas que definen las montañas submarinas son: elevada productividad, grandes reservas de peces con valor comercial, notable biodiversidad y alto grado de endemismo de la fauna bentónica. Todas ellas son consecuencia de sus particularidades topográficas e hidrográficas (Forges, Koslow y Poore 2000).

Igual que sucede con otras zonas de terreno difícil, como los cañones, sabemos muy poco de la biodiversidad, la distribución y el funcionamiento de las montañas submarinas. Sin embargo, sí sabemos que la pesca en las montañas submarinas ha sido muy intensa en las últimas décadas (Koslow et al. 2001), y que ello podría tener graves consecuencias a largo plazo sobre la biodiversidad de un ecosistema aún por conocer. Hoy en día, con la ayuda de nuevos estudios basados en medios tecnológicos como los ROV (vehículos de control remoto) o las cámaras incorporadas a remolcadores de grandes profundidades, se están implantando medidas para favorecer su adecuada gestión y conservación (v. apartado 3.6).

3.3.1.5. ÁREAS ANÓXICAS

En determinadas regiones geográficas existen masas de agua con concentraciones muy bajas de oxígeno (<0,5 ml/l de O₂ en disolución) que bañan el suelo marino del margen continental, dando lugar a la aparición de sedimentos con bajas concentraciones de oxígeno o zonas con concentraciones mínimas de oxígeno (ZMO). Las ZMO surgen en zonas donde existe una intensa producción primaria en superficie y poca circulación de las aguas, donde la degradación biológica de la materia orgánica en la columna de agua provoca una disminución de oxígeno (Rogers 2000; Levin 2003). Las ZMO del fondo marino aparecen típicamente en aguas a 200-1.000 m de profundidad de la región este del Pacífico, el margen noroeste del Pacífico, Filipinas, la bahía de Bengala, el mar Arábigo y el suroeste de África por debajo de la corriente de Benguela (Rogers 2000; Levin 2003). Pero, a pesar de las bajas concentraciones de oxígeno, algunos protozoos y metazoos pueden sobrevivir en estos ecosistemas. Las altas concentraciones de materia orgánica sustentan densas poblaciones de bacterias capaces de oxidar el sulfuro (p. ej., *Beggiatoa*, *Thioploca*, *Thiomargarita*) y comunidades de protozoos y metazoos de baja biodiversidad pero altas biomásas. Los principales grupos de organismos en estas zonas son foraminíferos, nematodos, ciliados, flagelados, poliquetos, gasterópodos y bivalvos con adaptaciones específicas para sobrevivir en condiciones de concentraciones de oxígeno bajas, a saber: elevadas concentraciones de hemoglobina y piruvato oxidorreductasa, amplias superficies de respiración, cuerpo pequeño y delgado, y presencia de simbioses con capacidad para oxidar sulfuro (Levin 2003; v. apartado 3.3.2.3 para más información sobre el ensamblaje quimiosintético en las ZMO).

3.3.1.6. LLANURAS ABISALES

Las llanuras abisales constituyen el mayor ecosistema del planeta. Se extienden por debajo del talud continental, entre 3.000 y 6.000 m de profundidad. Están recubiertas por una gruesa capa de sedimento fino –que puede alcanzar miles de metros de espesor–, responsable de dar al lecho oceánico el típico aspecto de superficie llana y monótona. Las principales características de las masas de agua de las llanuras abisales son: temperaturas bajas (~2 °C, excepto en el Mediterráneo, con 13 °C, y en el mar Rojo, con 21,5 °C), salinidad (35‰, excepto en el Mediterráneo y en el mar Rojo, donde es >39‰), concentraciones de oxígeno disuelto cercanas a la saturación (5-6 ml/l), ausencia de luz (la luz necesaria para la fotosíntesis no penetra más allá de los ~250 m de profundidad) y presión elevada (1 atmósfera por cada 10 m de profundidad). Esta distribución relativamente uniforme de los factores físicos es la causa por la que durante años se pensó que las llanuras abisales eran hábitats estables donde las condiciones físicas y biológicas se mantenían constantes durante cortas y largas escalas de tiempo. No obstante, hoy en día existen pruebas de que las llanuras abisales sufren alteraciones físicas, como las variaciones diarias y anuales (mareas) del flujo de agua fría y densa más próxima al fondo marino, y que tales perturbaciones inducen importantes cambios biológicos. En general no acaba de entenderse el efecto de estas mareas sobre las comunidades biológicas, pero algunos autores sugieren que podrían ser aprovechadas por determinadas especies para orientarse o para establecer claves biológicas internas para la puesta sincronizada (Tyler 1998). Asimismo, también es posible que se produzcan incidentes imprevistos muy enérgicos, como tormentas bentónicas o corrientes de densidad, que pueden tener graves consecuencias sobre el fondo marino, especialmente por la redistribución de los sedimentos y las respuestas biológicas que de ella se derivan (Aller 1989). Otro factor medioambiental que afecta de manera importante a las comunidades bentónicas de las llanuras abisales es la deposición estacional de fitodetritus (materia orgánica de las aguas superficiales) tras los meses de elevada producción (Beaulieu y Smith 1998). El rápido descenso de este material impide que los detritívoros pelágicos lo consuman todo, y se convierte así en una fuente periódica de nutrientes de alta calidad para las comunidades abisales (Ginger et al. 2001; Billett et al. 2001).

Las llanuras abisales albergan una gran biodiversidad, constituida principalmente de macro y meiofauna. La meiofauna (organismos cuyo tamaño se mide en micras) está compuesta principalmente por nematodos y foraminíferos (Gooday 1996). La macrofauna (organismos cuyo tamaño se mide en milímetros) está integrada principalmente por poliquetos, si bien también son abundantes algunos pequeños crustáceos peracáridos, moluscos, nemertinos, sipuncúlidos, equiuros y enteropneustos (Grassle y Maciolek 1992). Por último, la megafauna (organismos cuyo tamaño se mide en centímetros) está formada por holoturias (pepinos de mar), asteroideos (estrellas de mar), equinoideos (erizos de mar), crustáceos decá-

podos y peces, y por fauna sésil, como crinoideos, esponjas y antozoarios sobre sustrato duro (Gage y Tyler 1991).

A pesar de que las llanuras abisales han sido muestreadas desde los tiempos de la expedición del *Challenger*, sólo conocemos con detalle una pequeña parte de estos extensos ecosistemas. Los últimos resultados de estudios realizados en las llanuras abisales han revelado que cambios en la producción primaria en las aguas superficiales pueden tener efectos a largo plazo sobre la composición de su megafauna. Por ejemplo, se ha demostrado que una pequeña holoturia, *Amperima rosea*, casi inexistente en la llanura abisal Porcupine (región nordeste del océano Atlántico) antes de 1996, pasó rápidamente a ser una especie dominante a partir de ese año, gracias a su capacidad para aprovechar los recursos nutricionales de los fitodetrítus estacionales (Wigham, Tyler y Billett 2003). Esto nos indica que existe una estrecha relación entre el ecosistema abisal y la superficie de la biosfera, de modo que factores como el cambio climático podrían tener importantes consecuencias sobre la biodiversidad de las llanuras abisales.

3.3.2. Ecosistemas quimiosintéticos

Los ecosistemas quimiosintéticos de las aguas profundas se conocen y estudian desde hace tan sólo 30 años. Los primeros ecosistemas descubiertos de este tipo fueron las fuentes hidrotermales, en 1977, ¡ocho años después de que Neil Armstrong y Buzz Aldrin pisaran la Luna! Posteriormente se descubrieron más comunidades de las aguas profundas que dependían de la energía química proveniente del subsuelo marino –como las surgencias frías–, los grandes restos orgánicos que descienden hacia el fondo marino –como, por ejemplo, esqueletos de ballenas, maderas o algas kelp– y las zonas con concentraciones mínimas de oxígeno que bañan el fondo de ciertos márgenes continentales. Los responsables de la producción primaria en los ecosistemas quimiosintéticos son microorganismos quimioautotróficos que sintetizan materia orgánica a partir de materia inorgánica reducida. Estos microorganismos pueden ser de vida libre, agregados en *biofilms*, o vivir en simbiosis con algunos de los grupos más importantes de invertebrados.

3.3.2.1. FUENTES HIDROTERMALES

Las fuentes hidrotermales fueron descubiertas por primera vez en 1977 en la dorsal de las Galápagos (Lonsdale 1977; Corliss et al. 1979). Desde entonces se han encontrado también en el resto de cuencas oceánicas. Las fuentes hidrotermales aparecen en las dorsales oceánicas, en cuencas aisladas cercanas a zonas de subducción y en algunas montañas submarinas activas. Las dorsales oceánicas son cordilleras volcánicas que se forman en el eje de separación entre dos placas tec-

tónicas contiguas. En estas zonas, las aguas frías del fondo marino (2 °C) penetran a través de las hendiduras de la corteza. Durante su transición por el manto, estas aguas se calientan al pasar cerca de la cámara magmática que alimenta la dorsal. En el proceso, el fluido sufre cambios químicos, perdiendo oxígeno y magnesio y cargándose de otros metales. Al aumentar de temperatura, el fluido supercaliente (350 °C) sube hacia la superficie del fondo marino y, al mezclarse con el agua fría y rica en oxígeno que lo rodea, los metales disueltos en el fluido precipitan, formando las densas fumarolas negras tan características de las fuentes hidrotermales (foto 3.4).

Uno de los descubrimientos más sorprendentes en las fuentes hidrotermales fue el hallazgo de densas poblaciones biológicas y la estructura trófica que sustenta estas comunidades. Nadie esperaba encontrar densas comunidades de animales capaces de vivir sin energía solar, aprovechando la energía de compuestos químicos reducidos provenientes del interior de la Tierra que los microorganismos quimiosintéticos usan para producir materia orgánica y así mantener la red trófica (Karl, Wirsen y Jannasch 1980; Jannasch y Mottl 1985). Pero más sorprendente fue, si cabe, descubrir que estos microorganismos establecían relaciones de simbiosis con la mayoría de grupos importantes de invertebrados (Cavanaugh et al. 1981; Felbeck, Childress y Somero 1981), y observar la gran variedad de adapta-

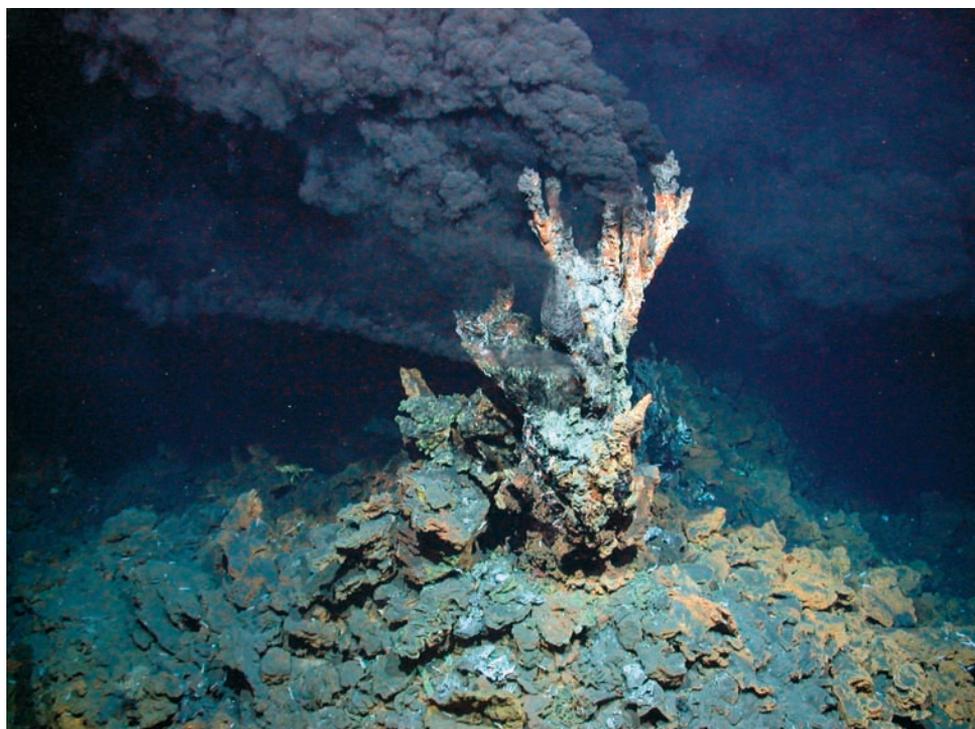


Foto 3.4: Fumarola negra en la dorsal atlántica



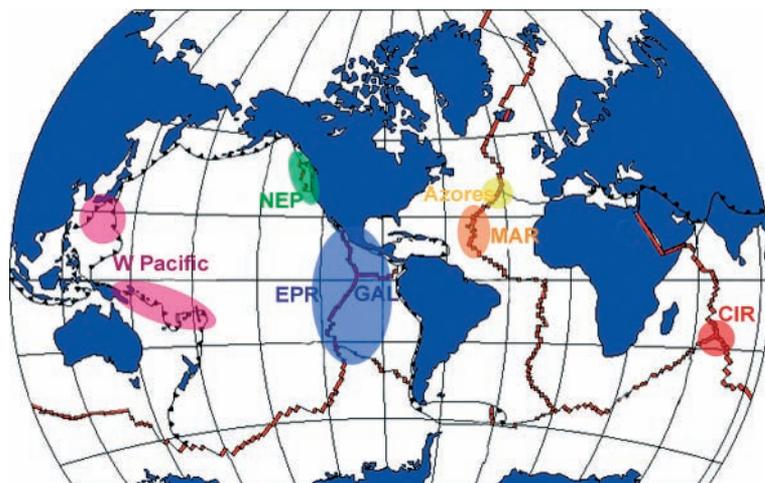
Foto 3.5 (izda.): Gasterópodos de las fuentes hidrotermales de la cuenca de Lau, en el Pacífico oeste. Foto 3.6 (dcha.): Cangrejos galatéidos de las fuentes hidrotermales del Pacífico

ciones que estos invertebrados habían desarrollado para sobrevivir en las fuentes hidrotermales. Uno de los invertebrados con un mayor número de adaptaciones es seguramente el gusano tubícula gigante *Riftia pachyptila*, que vive en las fuentes hidrotermales del Pacífico (foto 3.2). Este animal no tiene boca ni sistema digestivo, pero en su lugar posee un órgano llamado trofosoma que ocupa prácticamente todo su cuerpo. El trofosoma es una especie de saco repleto de bacterias quimioautotróficas. *Riftia pachyptila* extrae oxígeno del agua que lo rodea y CO_2 y H_2S procedentes de los fluidos hidrotermales por medio de su bien irrigada zona apical o pluma, que sobresale del tubo en el que vive este animal. Los compuestos químicos circulan a través de sus vasos sanguíneos hasta llegar al trofosoma, donde son utilizados por las bacterias para sintetizar materia orgánica. La supervivencia y la reproducción de *Riftia pachyptila* dependen totalmente de la producción de las bacterias. También existen relaciones de simbiosis en otros grupos, como almejas, mejillones, gambas, cangrejos y poliquetos, con un grado de dependencia variable.

En ocasiones, a las fuentes hidrotermales se las denomina «oasis» de vida de los fondos marinos profundos, por el exuberante aspecto de sus densas poblaciones de grandes invertebrados. Sin embargo, igual que sucede en otros ecosistemas con parámetros fisicoquímicos extremos, las comunidades de las fuentes hidrotermales son sistemas sencillos. La biodiversidad en las fuentes hidrotermales es baja, pero la biomasa es alta y se mantiene gracias al abundante y constante aporte de energía en forma de compuestos químicos reducidos que emanan de los fluidos. Desde su descubrimiento, en 1977, se han descrito 590 especies de orga-

nismos en las fuentes hidrotermales, lo que equivale a una nueva especie cada dos semanas (Van Dover et al. 2002). Además, cerca de 400 de las casi 600 especies descritas son endémicas. Los principales grupos de organismos en las fuentes hidrotermales son los gusanos tubícolas vestimentíferos, mejillones del género *Bathymodiolus*, almejas de la familia Vesicomiyidae, gambas de la familia Bresiliidae, cangrejos, anfípodos y poliquetos (fotos 3.5 y 3.6). Los estudios de las fuentes hidrotermales se encuentran todavía en una primera y larga fase exploratoria, y hasta ahora sólo se ha examinado una pequeña fracción de los 65.000 km del sistema dorsal. No obstante, los datos disponibles indican que la fauna de las fuentes hidrotermales forma distintas regiones biogeográficas. En un estudio realizado por Van Dover et al. (2002) se reconocen seis regiones biogeográficas de fuentes hidrotermales, cada una de ellas con su correspondiente composición faunística (mapa 3.2). Pero todavía queda mucho por estudiar y conocer antes de que podamos comprender la diversidad global de especies en las fuentes hidrotermales y los procesos que determinan su distribución y funcionamiento.

Mapa 3.2: Sistema de dorsales oceánicas, donde se muestran las regiones biogeográficas de las fuentes hidrotermales.



Regiones biogeográficas de las fuentes hidrotermales. Azores: dominadas por mejillones del género *Bathymodiolus*, anfípodos y gambas del orden Caridea; MAR: región norte de la dorsal atlántica media, dominada por gambas del orden Caridea, principalmente *Rimicaris exoculata*, y mejillones del género *Bathymodiolus*; EPR y GAL: dorsal del Pacífico este y dorsal de las Galápagos, dominadas por gusanos tubícolas del grupo Vestimentifera, mejillones del género *Bathymodiolus*, almejas de la familia Vesicomiyidae, poliquetos de la familia Alvinellidae, anfípodos y cangrejos. NEP: región nordeste del Pacífico, dominada por gusanos tubícolas vestimentíferos, a excepción de Riftiidae, poliquetos y gasterópodos; W Pacific: Pacífico oeste, dominado por mejillones del género *Bathymodiolus*, gasterópodos «peludos», almejas de la familia Vesicomiyidae y gambas; y CIR: dorsal del Índico central, dominada por la gamba *Rimicaris*, mejillones, gasterópodos y anémonas.

Fuente: Mapa modificado de Van Dover et al. 2002.

3.3.2.2. SURGENCIAS FRÍAS

Las comunidades de las surgencias frías fueron descubiertas en 1983 a 500 m aproximadamente de profundidad en el margen oeste de Florida, en el Golfo de México (Paull et al. 1984). Las surgencias frías se caracterizan por la filtración de fluido frío con concentraciones elevadas de metano. El metano puede ser de origen biológico –procedente de la descomposición de la materia orgánica que realizan algunas bacterias en sedimentos anóxicos– o de origen termogénico –producido a partir de la rápida transformación de la materia orgánica provocada por altas temperaturas– (Sibuet y Olu 1998; Levin 2005). Otra característica de las surgencias frías son las altas concentraciones de H_2S en los sedimentos, producto de la reducción bacteriana de sulfatos –con la ayuda del metano–. Tanto el metano como el sulfuro desempeñan un papel esencial en el mantenimiento de las tan productivas comunidades de las surgencias frías (foto 3.7) a través de bacterias quimioautotróficas de vida libre y simbiontes (Paull et al. 1984; Barry et al. 1997). Las comunidades de las surgencias frías pueden encontrarse tanto en el margen pasivo (p. ej., en el Golfo de México, el talud continental de Carolina, el mar de Barents, el Golfo de Guinea y el margen continental de Angola) como en el talud activo –o zonas de subducción–, principalmente en el Pacífico (p. ej., en el margen de Perú-Chile), pero también en el prisma de acreción de Barbados y en la zona este del Mediterráneo.



Foto 3.7: Comunidad de mejillones del género *Bathymodiolus* en las surgencias frías del Golfo de México



Foto 3.8: Gusanos tubícolas *Lamellibrachia* de las surgencias frías del Golfo de México

Igual que en el caso de las fuentes hidrotermales, sólo se ha explorado una pequeña fracción de las posibles ubicaciones de surgencias frías. Hasta el momento únicamente se han descubierto 35 regiones con surgencias frías y tan sólo conocemos con detalle la geoquímica y la biología de unas pocas (Sibuet y Olu 1998; Kojima 2002; Levin 2005).

Desde su descubrimiento se han descrito 230 especies de organismos en las surgencias frías. Estos sistemas son más estables que las fuentes hidrotermales. Además se da una lenta transición de factores físicos y químicos entre el hábitat de las surgencias y el sistema heterotrófico que lo rodea, que propicia más biodiversidad que en las fuentes hidrotermales. Los principales grupos en las surgencias frías son bivalvos (Mitilidae, Vesicomidae, Lucinidae y Thyasiridae) y gusanos tubícolas del filo Vestimentifera, aunque a veces también pueden encontrarse abundantes pogonóforos, esponjas, gasterópodos y gambas (Levin 2005) (foto 3.8).

3.3.2.3. OTROS HÁBITATS REDUCTORES

Craig Smith, de la Universidad de Hawái, fue el primero en observar, en 1987, comunidades quimiosintéticas en el esqueleto de una ballena (foto 3.9), encontra-

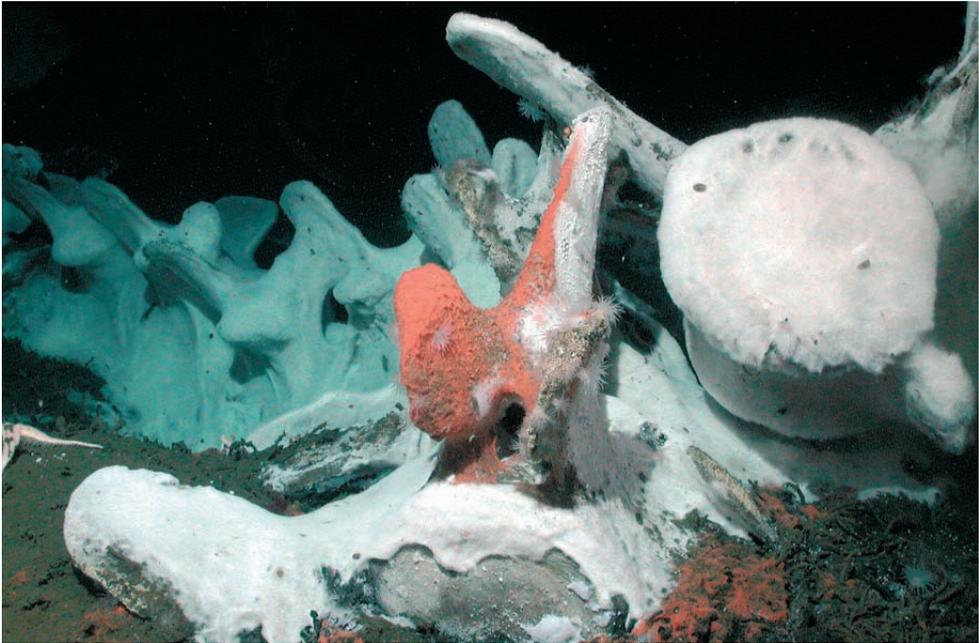


Foto 3.9: Esqueleto de ballena colonizado por una capa de bacterias en el fondo marino

do por casualidad en el norte del Pacífico durante una inmersión en el sumergible *Alvin* (Smith et al. 1989).

Desde entonces, el estudio de las comunidades biológicas en los restos de ballena y otros restos orgánicos de gran tamaño, como madera hundida y algas kelp, ha avanzado con rapidez. En el caso particular de los restos de ballena, existe una progresión ecológica en tres fases (Smith y Baco 2003). Primero, durante la fase carroñera, algunos organismos se comen la carne y dejan el esqueleto al descubierto. A continuación viene la fase oportunista, en la que los sedimentos y el esqueleto son colonizados por una densa población de poliquetos y crustáceos. La tercera y última fase es la quimiotrófica, también llamada fase sulfofílica. Los huesos de las ballenas están compuestos en un 60% de lípidos; la degradación bacteriana anaeróbica de estos lípidos produce sulfuros que, posteriormente, son utilizados por microorganismos quimioautotróficos, lo que favorece la colonización por parte de fauna que depende de la energía química (Smith y Baco 2003).

La biodiversidad de la fauna que coloniza estos hábitats aislados y efímeros es elevada. Desde su descubrimiento se han observado algo más de 400 especies morfológicas en los restos de ballenas, pero todavía quedan muchas más por identificar. Algunos autores han sugerido que los restos de ballenas podrían actuar como nexos de unión para la dispersión de especies entre los ecosistemas

quimiosintéticos a través de sus estados larvarios (Smith et al. 1989). Esta teoría está respaldada por el hecho de que los tres hábitats quimiosintéticos (fuentes hidrotermales, surgencias frías y esqueletos de ballena) comparten algunas especies y un número aún mayor de grupos de organismos de niveles taxonómicos superiores (Smith y Baco 2003).

Finalmente, las zonas con mínimos de oxígeno también tienen las características químicas que permiten sustentar la vida quimiosintética (v. apartado 3.3.1.5). Un elevado número de heterótrofos de las ZMO consumen las bacterias quimioautotróficas de los *biofilms*, o bien se alimentan de animales que han ingerido estas bacterias previamente (Gallardo et al. 1995). La presencia de bacterias endosimbióticas con capacidad para oxidar azufre es frecuente igualmente en los foraminíferos, los flagelados, los ciliados y algunos poliquetos y bivalvos (Levin 2005). En la actualidad siguen sin conocerse los detalles de las interacciones metabólicas entre el huésped y el simbionte y hasta qué punto la quimiosíntesis es fuente de nutrientes en las ZMO bentónicas. Pero, sin lugar a dudas, estudios actuales y futuros ampliarán el listado de relaciones y contribuirán a explicar las uniones filogenéticas y evolutivas con la fauna de otros ecosistemas quimiosintéticos de aguas profundas.

Del total de especies descritas en fuentes hidrotermales, surgencias frías y restos de ballenas, las fuentes hidrotermales y las surgencias frías comparten 18, las fuentes hidrotermales y los restos de ballenas 11, las surgencias frías y los restos de ballenas 20, y 7 son comunes a los tres hábitats (Tunnicliffe, McArthur y McHugh 1998; Smith y Baco 2003). Sin embargo, estos números cambiarán en cuanto se descubran nuevas especies y prosiga el estudio de las zonas actualmente conocidas. Con ello lograremos ampliar nuestros conocimientos sobre la diversidad y la distribución de las especies en los hábitats quimiosintéticos de las aguas profundas, así como sobre los procesos que las rigen.

3.4. LA TECNOLOGÍA Y LA EXPLORACIÓN DEL FONDO MARINO

Desde las primeras expediciones oceanográficas del siglo XIX, la exploración y la investigación del fondo marino han evolucionado en paralelo a los avances tecnológicos. La flota oceanográfica internacional es grande y diversa, y dispone de cables de remolque y perforación para los instrumentos de muestreo del fondo marino profundo.

Antes de iniciar el estudio de cualquier comunidad biológica es preciso conocer las características geofísicas de su hábitat. El primer paso consiste en el uso de sistemas de batimetría multihaz montados en el casco –equipamiento ya habitual en los barcos de investigación actuales– para obtener mapas batimétricos del fondo marino. Los sonares de barrido lateral permiten la elaboración de mapas acústicos más detallados (foto 3.10).



Foto 3.10: El TOBI (Towed Ocean Bottom Instrument) es uno de los sonares de barrido lateral del Reino Unido utilizados para obtener mapas acústicos del fondo marino profundo

Estos instrumentos se remolcan detrás del barco, aproximadamente a 500 m por encima del fondo marino, y permiten obtener imágenes acústicas del fondo con información geofísica detallada, como la presencia de sedimentos o sustrato duro, elevaciones y depresiones. El estudio de la columna de agua con instrumentos como CTD –que miden en continuo la conductividad, temperatura y profundidad de la masa de agua estudiada durante su despliegue vertical– es un método importante para caracterizar los parámetros físicos de la masa de la zona estudiada.

El equipo tradicionalmente más utilizado en los estudios biológicos de la fauna de las profundidades marinas incluye redes de arrastre profundo para recoger muestras de megafauna; *multicorers* y *megacorers* para la obtención de muestras cuantitativas de testigos de sedimento, así como de la interfase sedimento-agua, que se usan en química orgánica, en el análisis de nutrientes y en estudios de la meiofauna; sacas testigo tipo *boxcorer* para la recolección de muestras cuantitativas de macrofauna; trampas de sedimentos para determinar la cantidad de fitodetritus que llega al fondo marino; y medidores de corrientes para el análisis de parámetros físicos. Finalmente, el estudio de los sistemas de las profundidades marinas dio un paso importante a partir del momento en que pudimos observar los hábitats mediante instrumentos fotográficos y de vídeo. Los remolcadores de profundidad equipados con cámaras fotográficas y de vídeo han sido muy útiles para la descripción in situ de los ecosistemas, así como para obtener información espacial y de distribución que otras muestras recogidas con redes de arrastre no pueden proporcionarnos. Estos instrumentos también son muy eficientes en hábitats de terreno complicado, como los cañones, las montañas submarinas o los corales de aguas profundas, donde el arrastre o la perforación para la toma de testigos de sedimento resultan difíciles, cuando no imposibles.

Uno de los avances tecnológicos más importantes de los últimos tiempos en oceanografía ha sido el desarrollo de sumergibles tripulados, vehículos operados por control remoto (ROV) y vehículos submarinos autónomos (AUV). Los sumergibles y los ROV no sólo permiten ver el fondo marino y la fauna directamente, sino que también facilitan el muestreo detallado y dirigido y la experimentación in situ. Estos vehículos resultan básicos en el estudio de los ecosistemas quimiosintéticos de las aguas profundas. Actualmente ya hay varios países que cuentan con sumergibles y ROV (cuadro 3.1, foto 3.11).

En la actualidad se han construido varios nuevos buques oceanográficos. Ejemplo de ello son el *B. O. Sarmiento de Gamboa* en España, el *N/O Pourquoi Pas?* en Francia, y el *RRS James Cook* en el Reino Unido. Todos ellos están diseñados para operar con sumergibles y/o ROV. Otra área de desarrollo tecnológico es la tecnología AUV. Los AUV permiten el estudio de zonas de difícil acceso o sin acceso, como el fondo marino situado por debajo del hielo de los océanos Ártico y Antártico. Recientemente se han utilizado AUV en la exploración y localización de fuentes hidrotermales. Es el caso del AUV *ABE* (WHOI, EE. UU.), que se ha empleado con éxito en la fase final del estudio de una sección de dorsal atlántica al sur del ecuador para dar la localización exacta y las primeras imágenes fotográficas de nuevas fuentes hidrotermales, en una única campaña oceanográfica de carácter exploratorio (foto 3.12).

Cuadro 3.1: Listado de sumergibles tripulados (SUB) y vehículos operados por control remoto (ROV) utilizados en el estudio actual de los ecosistemas quimiosintéticos

Nombre	Tipo vehículo	Organización	País	Profundidad máxima
<i>Ropos</i>	ROV	CSSF	Canadá	6.000 m
<i>Nautile</i>	SUB	Ifremer	Francia	6.000 m
<i>Robin</i>	ROV	Ifremer	Francia	3.000 m
<i>Victor 6000</i>	ROV	Ifremer	Francia	6.000 m
<i>Jago</i>	SUB	MPI Seewiesen	Alemania	400 m
<i>Quest</i>	ROV	Universidad de Bremen	Alemania	4.000 m
<i>Cherokee</i>	ROV	Universidad de Bremen	Alemania	1.000 m
<i>Shinkai 2000</i>	SUB	JAMSTEC	Japón	2.000 m
<i>Shinkai 6500</i>	SUB	JAMSTEC	Japón	6.500 m
<i>Dolphin 3k</i>	ROV	JAMSTEC	Japón	3.300 m
<i>Aglanta</i>	ROV	Universidad de Bergen	Noruega	2.000 m
<i>Argus</i>	ROV	Universidad de Bergen	Noruega	2.000 m
<i>Bathysaurus</i>	ROV	Universidad de Bergen	Noruega	5.000 m
<i>MIR 1 y MIR 2</i>	SUB	Shirshov Institute	Rusia	6.000 m
<i>Isis</i>	ROV	NOC (Southampton)	Reino Unido	6.500 m
<i>PISCES IV y PISCES V</i>	SUB	HURL (Hawái)	EE. UU.	2.000 m
<i>Alvin</i>	SUB	WHOI	EE. UU.	4.500 m
<i>Deepworker</i>	SUB	Nuytco Ltd (para NOAA-OE)	EE. UU.	600 m
<i>Johnson Sea Link 1</i>	SUB	HBOI	EE. UU.	900 m
<i>Hercules</i>	ROV	IFE	EE. UU.	4.000 m
<i>Jason</i>	ROV	WHOI	EE. UU.	6.000 m
<i>Tiburón</i>	ROV	MBARI	EE. UU.	4.000 m

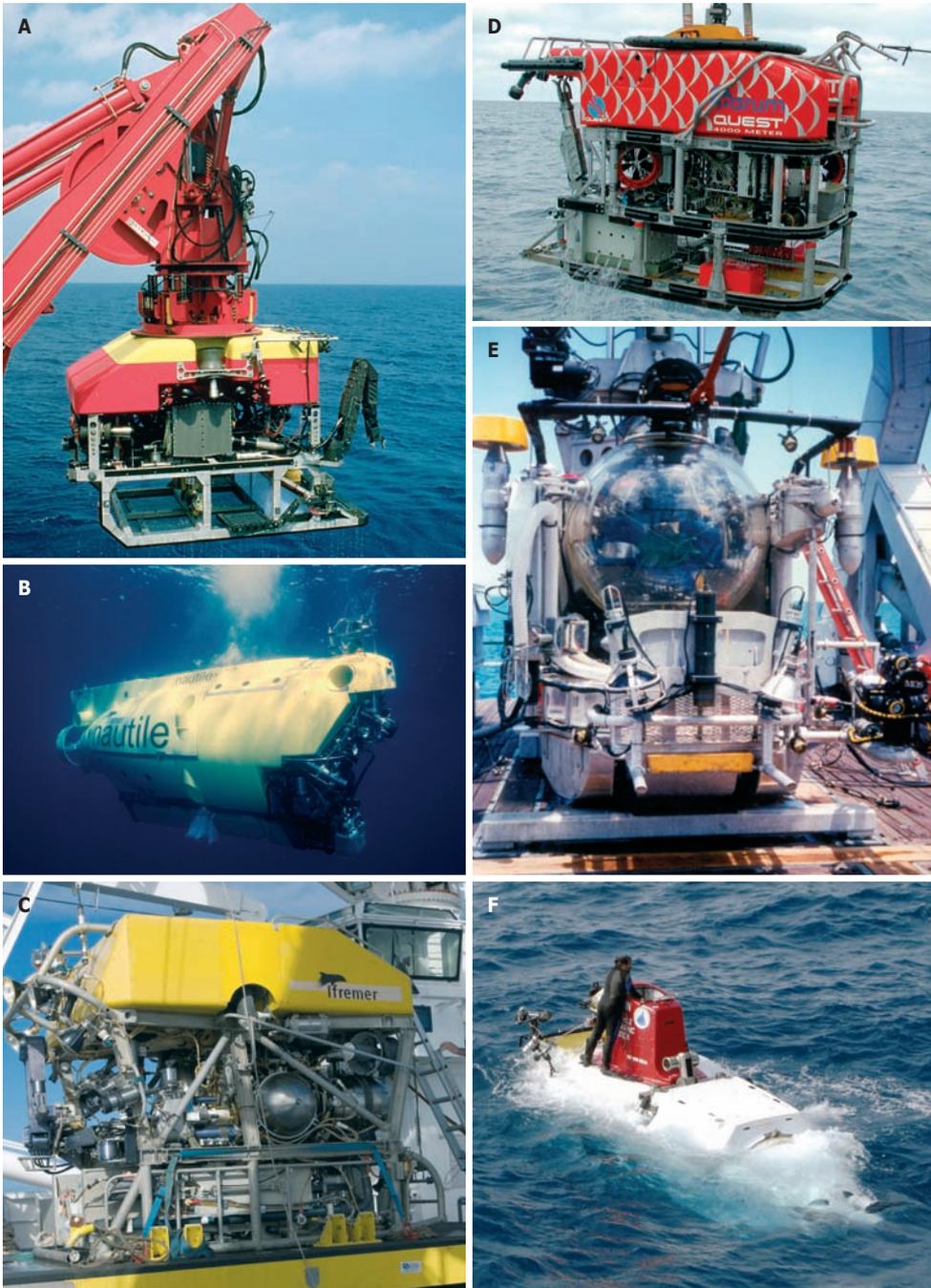


Foto 3.11: Algunos ejemplos de sumergibles tripulados y vehículos operados por control remoto de la flota internacional utilizados en el estudio de las profundidades marinas. A: el ROV británico *Isis*; B: el sumergible francés *Nautilus*; C: el ROV francés *Victor*; D: el ROV alemán *Quest*; E: el sumergible norteamericano *Johnson Sea Link*; F: el sumergible norteamericano *Alvin*.

El desarrollo de nuevas tecnologías también es importante en los métodos de análisis en el laboratorio. Por ejemplo, las técnicas moleculares marinas han evolucionado muy rápidamente. El enfoque molecular proporciona las herramientas necesarias para identificar especies crípticas y discriminar entre poblaciones y metapoblaciones, además de permitir analizar el flujo genético y las relaciones filogenéticas entre especies de distintos hábitats, la filogeografía y la evolución (Shank, Lutz y Vrijenhoek 1999). El desarrollo de isótopos estables y el análisis con biomarcadores también han resultado básicos en el estudio de la estructura trófica de las comunidades quimiosintéticas de las aguas profundas. Por ejemplo, los isótopos estables se han empleado para diferenciar entre pautas de alimentación heterotróficas y quimiotróficas en los ecosistemas quimiosintéticos (Van Dover y Fry 1994). Por otro lado, las técnicas basadas en biomarcadores se han aplicado para estudiar el papel de una pequeña holoturia, *Amperima rosea*, en el cambio de la fauna que durante largo tiempo se ha observado en la llanura abisal Porcupine, en la región nordeste del Atlántico (Wigham, Tyler y Billett 2003).

Además, el uso de cámaras hiperbáricas es de vital importancia cuando se trabaja con animales vivos de las profundidades marinas. Estas cámaras varían en su tamaño y prestaciones. Hay cámaras de presión pequeñas y simples para estudios embriológicos, basadas en un cilindro de titanio (Young et al. 1996), y otras más grandes, como la francesa IPOCAMP (Incubateur Pressurisé pour l'Observation



Foto 3.12: El vehículo submarino autónomo ABE del Instituto Oceanográfico Woods Hole, EE. UU.

et la Culture d'Animaux Marins Profonds), que puede llevarse en campañas oceanográficas y permite estudiar las respuestas de los grandes invertebrados sometidos a distintas presiones y temperaturas (Shillito et al. 2001). Este sistema se ha utilizado en estudios experimentales de la fauna de las fuentes hidrotermales. Uno de los mayores desafíos de los estudios en las aguas profundas radica en encontrar nuevas alternativas que nos permitan obtener muestras de fauna y subirlas a la superficie evitando su despresurización y los cambios de temperatura a los que están sometidas las muestras en su transporte desde el fondo marino hasta el barco.

3.5. PROGRAMAS EUROPEOS PARA EL ESTUDIO DE LAS PROFUNDIDADES MARINAS

Estamos todavía en una fase inicial del estudio de los ecosistemas de las profundidades marinas, ámbito donde la exploración desempeña un papel vital. Para entender los procesos que rigen los distintos hábitats de las profundidades marinas y el funcionamiento del ecosistema en su conjunto es necesario que los trabajos de investigación sean multidisciplinarios. Para alcanzar nuestros objetivos y movilizar equipos eficientes se requiere un esfuerzo internacional, con la participación de varios países con recursos y experiencia científica diversos. El reconocimiento de las profundidades marinas exige el uso de grandes plataformas (barcos de investigación, observatorios) y el perfeccionamiento constante de las tecnologías (vehículos que puedan sumergirse a grandes profundidades, técnicas de laboratorio; v. apartado 3.4). Debido a que se trata de hábitats remotos y de difícil acceso, la exploración y el estudio de las profundidades marinas han estado limitados por razones tanto logísticas como económicas. Por ello es preciso desarrollar programas internacionales y multidisciplinarios que permitan el acceso a instalaciones grandes y a expertos más allá de los límites fronterizos. A continuación se citan algunos ejemplos de estudios internacionales actuales para la investigación del medio marino profundo.

3.5.1. CoML (www.coml.org)

El CoML (Censo de la Vida Marina, en sus siglas inglesas) es una red creciente de científicos de 70 países comprometidos en una iniciativa de 10 años de duración (2000-2010) para evaluar y explicar la diversidad, distribución y abundancia de la vida en los océanos; pasado, presente y futuro (O'Dor y Gallardo 2005; Yarincik y O'Dor 2005). El CoML recibe su financiación de la A. P. Sloan Foundation (EE. UU.) y está compuesto por un programa que estudia la historia de las poblaciones marinas, por otro que analiza el futuro de dichas poblaciones gracias a sistemas de modelización y por 14 proyectos de campo que investigan el estado actual de todos los ecosistemas marinos más importantes, desde la zona

intermareal hasta las llanuras abisales. Cuatro de estos proyectos de campo se dedican al estudio de las profundidades marinas y, aunque son de naturaleza internacional, están dirigidos desde laboratorios europeos: ChEss (Reino Unido y España), MAR-ECO (Noruega), COMARGE (Francia y EE. UU.) y CeDAMar (Alemania). El objetivo principal de ChEss consiste en estudiar la biogeografía de los ecosistemas quimiosintéticos a escala global. ChEss tiene cuatro áreas de prioridad con varios programas en marcha (v. www.noc.soton.ac.uk/chess), en los que la coordinación internacional y el uso conjunto de los recursos humanos y las infraestructuras resultan primordiales. MAR-ECO (www.mar-eco.no) investiga las comunidades pelágicas y bentónicas no quimiosintéticas en la dorsal atlántica septentrional. COMARGE (www.ifremer.fr/comarge) examina los márgenes continentales a escala global, comparando los datos de estudios previos y actuales y abriendo nuevas líneas de investigación. CeDAMar (www.cedamar.org) analiza la vida en las llanuras abisales, con varios estudios en curso en los océanos Atlántico, Antártico, Pacífico e Índico. Además existen otros programas relacionados desde el punto de vista científico con estudios de las profundidades marinas, como los proyectos sobre montañas submarinas, sobre microorganismos y sobre los ecosistemas marinos del Ártico y la Antártida. Finalmente, uno de los legados a largo plazo de la iniciativa CoML será el OBIS, el sistema de información biogeográfica de los océanos (www.iobis.org). OBIS es un proveedor en Internet de información global sobre especies marinas referenciadas geográficamente donde se recopila toda la información recogida en los distintos proyectos del CoML y otros programas relacionados. En resumen, OBIS es una red de bases de datos integradas en un único portal.

3.5.2. MarBEF (www.marbef.org)

MarBEF (Marine Biodiversity and Ecosystem Functioning) es una red de excelencia financiada por la Comisión Europea e integrada por 78 institutos marinos de toda Europa. Su objetivo radica en integrar y difundir el conocimiento en biodiversidad marina a investigadores, empresas, grupos de interés y público en general. MarBEF tiene una rama dedicada al estudio de las profundidades marinas, DEEPSETS (Deep-Sea & Extreme Environments, Patterns of Species and Ecosystem Time-Series), formada por 11 laboratorios europeos que llevan a cabo grandes estudios multidisciplinares de calidad en las profundidades marinas. DEEPSETS ha financiado dos tesis doctorales, una de ellas dedicada al estudio de la biodiversidad y los cambios a largo plazo de la meiofauna abisal, y la otra centrada en el estudio de la biodiversidad y los cambios a largo plazo de las comunidades quimiosintéticas. Paralelamente organiza talleres sobre grupos taxonómicos específicos y temas ecológicos para asegurar la transmisión de los conocimientos adquiridos por los científicos experimentados a la remesa de jóvenes que liderarán las investigaciones futuras en Europa.

3.5.3. HERMES (www.eu-hermes.net)

HERMES (Hotspot Ecosystem Research on the Margins of European Seas, 2005-2009) es un proyecto integrado, financiado por el Sexto Programa Marco de la Comisión Europea y formado por 45 grupos de investigación, incluyendo 9 pymes, procedentes de 15 países. El proyecto reúne a expertos en biodiversidad, geología, sedimentología, oceanografía física, microbiología y biogeoquímica para estudiar los puntos calientes de los ecosistemas de los márgenes continentales. Su objetivo principal consiste en establecer las relaciones entre la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas en las laderas de sedimentos en zonas de desprendimiento de tierras, corales de aguas profundas, cañones, sedimentos anóxicos sustentados por comunidades microbianas y surgencias frías.

HERMES es novedoso porque estudiará la totalidad del margen continental europeo integrando toda la información obtenida en varias disciplinas y distintas zonas geográficas, facilitando la comparación de ecosistemas diferenciados pero interrelacionados, y proveyendo información para decisiones de gestión a un nivel supranacional. Las campañas de investigación, el muestreo y los análisis de laboratorio utilizan tecnología punta, y se han establecido lazos con otros programas, como ChEss y COMARGE del CoML.

3.6. GESTIÓN Y CONSERVACIÓN

El fondo marino es el mayor ecosistema de la Tierra y un reservorio de biodiversidad todavía por conocer. Es también uno de los hábitats menos estudiados del planeta. Pero con el rápido desarrollo de las nuevas tecnologías, industrias como la extracción petrolífera, la pesca de arrastre de profundidad o la minería están penetrando cada vez más en las zonas profundas de los océanos. Estas actividades humanas, así como el vertido de materiales tóxicos, están afectando a un ecosistema muy frágil, a veces incluso antes de que conozcamos la diversidad y el funcionamiento de sus diferentes comunidades. Las alteraciones antropogénicas son especialmente importantes en el fondo marino, porque muchas de las especies que alberga tienen una vida larga, crecen lentamente y su maduración sexual es tardía, de modo que la recuperación de las poblaciones afectadas por posibles alteraciones del medio puede ser un proceso largo, pudiéndose llegar incluso a la extinción. Algunos de los ecosistemas con mayor riesgo son los corales de aguas profundas, las montañas submarinas por debajo de los 1.000 m de profundidad donde crecen y se desarrollan varias especies de peces comerciales.

En el espacio económico europeo, muchas de las áreas de pesca se solapan con zonas coralinas (Freiwald et al. 2004). En el océano Atlántico se han encontrado evidencias de daños importantes debidos a la utilización de las técnicas de arrastre en márgenes continentales donde se desarrollan comunidades coralinas. Los efec-

tos de la pesca sobre los corales de aguas profundas no se traducen únicamente en una merma de la biodiversidad, sino también en la destrucción de un ecosistema y en la pérdida de hábitats que albergan gran variedad de especies. Esto es especialmente importante en ecosistemas donde viven especies longevas, por los motivos expuestos anteriormente. En los últimos años se han puesto en marcha varias iniciativas con el fin de proteger los corales de las aguas profundas. Según la Convención OSPAR (Convención para la Protección del Medio Marino en el Atlántico Nordeste), los corales de aguas profundas son uno de los ecosistemas más vulnerables del planeta y donde es preciso implantar medidas de protección. Asimismo, la CE garantizó en 2003 la protección urgente de un área al noroeste de Escocia (Darwin Mounds) donde viven corales de agua fría, y en 2004 propuso la prohibición de practicar el arrastre cerca de los arrecifes de coral de las Azores, Madeira y las islas Canarias. Por otro lado, el Departamento de Pesca y Océanos de Canadá (DFO) ordenó cerrar una zona de *Lophelia* en Nueva Escocia.

Las características hidrográficas de las montañas submarinas favorecen una alta productividad, que atrae a grandes animales, entre ellos algunas especies de peces comerciales. El resultado ha sido un aumento de la explotación de los recursos biológicos alrededor de las montañas submarinas, incluso antes de que sus ecosistemas hayan sido caracterizados y estudiados con detalle. A raíz de ello, la Convención OSPAR y el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, World Wildlife Fund) reconocieron las montañas submarinas como puntos calientes y las consideraron zonas prioritarias para la gestión medioambiental. Nueva Zelanda, Australia y Canadá ya han adoptado algunas medidas a favor de la conservación y la protección de estos ecosistemas, pero ninguna de ellas se ha aplicado todavía en aguas europeas. La pesca de arrastre de profundidad también ha provocado el colapso casi total de las poblaciones de especies comerciales en algunas zonas. Tal es el caso de la pesca del pez emperador (*Hoplostethus atlanticus*) a 750 y 1.200 m de profundidad en las aguas de Nueva Zelanda, actualmente sujeta a estrictas cuotas. Para evitar la sobreexplotación de especies comerciales y el daño al hábitat bentónico del fondo marino profundo en el Mediterráneo, la comunidad científica, en colaboración con la Unión Mundial para la Naturaleza (UICN) y WWF, consiguió prohibir el arrastre por debajo de los 1.000 m y la pesca con red de cerco en todos los países mediterráneos, tras aprobarse su propuesta en la vigésimo novena sesión de la Comisión General de Pesca del Mediterráneo (GFCM, General Fisheries Commission for the Mediterranean), celebrada en Roma en 2005. Esto es lo que se conoce como el principio del enfoque preventivo, aplicado, en este caso, a la protección de un ecosistema rico, pero todavía desconocido, en el que encontramos gran variedad de puntos calientes, como surgencias frías, corales de aguas profundas, cañones, cubetas hipersalinas y montañas submarinas.

La exploración y la explotación de los hidrocarburos (petróleo y gas) también están avanzando rápidamente hacia zonas de aguas más profundas. Se desconocen los posibles efectos de las plataformas de extracción y los procesos de explotación sobre los ecosistemas cercanos, pero la industria del gas y del petróleo ha

trabajado conjuntamente con la comunidad científica para obtener información fiable sobre la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas y para apoyar el desarrollo de medidas de gestión eficientes en las zonas potencialmente explotables.

Con relación a la minería en aguas internacionales, la ISA (International Seabed Authority) es la agencia de la ONU encargada de desarrollar reglamentos y procedimientos relacionados con la explotación de los recursos minerales en el «Área» (fondo marino fuera de los límites de jurisdicción nacionales) y favorecer su gestión sostenible. La ISA concederá derechos de explotación a los diferentes países en zonas específicas (p. ej., para nódulos polimetálicos, depósitos de azufre, nódulos de ferromanganeso), pero manteniendo un cierto porcentaje para la conservación. La ISA colabora muy estrechamente con los científicos y la industria para ofrecer a la comunidad internacional reglamentos que ayuden a gestionar los recursos del «Área» y a conservar sus ecosistemas y biodiversidad.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLER, J. Y. «Quantifying sediment disturbance by bottom currents and its effect on benthic communities in a deep-sea western boundary zone». *Deep-Sea Research* 36 (1989): 901-934.
- BARRY, J. P., R. E. KOICHEVAR, J. HASHIMOTO, Y. FUJIWARA, K. FUJIKURA, y H. G. GREENE. «Studies of the physiology of chemosynthetic fauna at cold seeps in Sagami Bay, Japan». *JAMSTEC Journal of Deep Sea Research* 13 (1997): 417-423.
- BEAULIEU, S. E., y K. L. J. SMITH. «Phytodetritus entering the benthic boundary layer and aggregated on the sea floor in the abyssal NE Pacific: macro- and microscopic composition». *Deep-Sea Research II* 45 (1998): 781-815.
- BILLETT, D. S. M., B. J. BETT, A. L. RICE, M. H. THURSTON, J. GALÉRON, M. SIBUET, y G. A. WOLFE. «Long-term change in the megabenthos of the Porcupine Abyssal Plain». *Progress in Oceanography* 50 (2001): 325-348.
- CAVANAUGH, C. M., S. L. GARDINER, M. L. JONES, H. W. JANNASCH, y J. B. WATERBURY. «Prokaryotic cells in hydrothermal vent tube worm *Riftia pachyptila* Jones: possible chemoautotrophic symbionts». *Science* 213 (1981): 340-342.
- CORLISS, J. B., J. DYMOND, L. I. GORDON, J. M. EDMOND, R. P. VON HERZEN, R. D. BALLARD, K. GREEN, D. WILLIAMS, A. BAINBRIDGE, K. CRANE, y T. H. VAN ANDEL. «Submarine thermal springs on the Galapagos Rift». *Science* 203 (1979): 1073-1083.
- FELBECK, H., J. J. CHILDRESS, y G. N. SOMERO. «Calvin-Benson cycle and sulfide oxidation enzymes in animals from sulfide-rich habitats». *Nature* 293 (1981): 291-293.
- FORGES, B. R. DE, J. A. KOSLOW, y G. C. B. POORE. «Diversity and endemism of the benthic seamount fauna in the southwest Pacific». *Nature* 405 (2000): 944-947.
- FREIHALD, A. «Reef-forming cold-water corals». En G. Wefer, D. S. M. Billett, D. Hebeln, B. B. Jorgensen, M. Schluter y T. C. E. Van Weering. *Ocean margin systems. Hanse conference report*. Berlín: Springer, 2002, 365-385.
- FREIHALD, A., J. H. FOSSÅ, A. GREHAN, T. KOSLOW, y J. M. ROBERTS. *Cold-water coral reefs*. Cambridge, Reino Unido: UNEP-WCMC, 2004.

- GAGE, J. D. «Benthic biodiversity across and along the continental margin: patterns, ecological and historical determinants and anthropogenic threats». En G. Wefer, D. S. M. Billett, D. Hebbeln, B. B. Jorgensen, M. Schluter y T. C. E. Van Weering. *Ocean margin systems. Hanse conference report*. Berlín: Springer, 2002, 307-321.
- GAGE, J. D., y P. A. TYLER. *Deep-sea biology. A natural history of organisms at the deep-sea floor*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- GALLARDO, V. A., F. D. CARRASCO, R. ROAR, y J. I. CAÑETES. «Ecological patterns in the benthic microbiota across the continental shelf off Central Chile». *Ophelia* 40 (1995): 167-188.
- GINGER, M. L., D. S. M. BILLETT, K. L. MACKENZIE, K. KIRIAKOULAKIS, R. R. NETO, D. K. BOARDMAN, V. L. C. S. SANTOS, I. M. HORSFALL, y G. A. WOLFF. «Organic matter assimilation and selective feeding by holothurians in the deep sea: some observations and comments». *Progress in Oceanography* 50 (2001): 407-421.
- GOODAY, A. J. «Epifaunal and shallow infaunal foraminiferal communities at three abyssal NE Atlantic sites subject to differing phytodetritus input regimes». *Deep-Sea Research I* 43 (1996): 1395-1421.
- GRASSLE, J. F. «Slow recolonisation of deep-sea sediment». *Nature* 26 (1977): 618-619.
- GRASSLE, J. F., y N. J. MACIOLEK. «Deep-sea richness: regional and local diversity estimates from quantitative bottom samples». *American Naturalist* 139 (1992): 313-341.
- GRASSLE, J. F., y H. L. SANDERS. «Life histories and the role of disturbance». *Deep-Sea Research* 20 (1973): 643-659.
- HESSLER, R. R., y H. L. SANDERS. «Faunal diversity in the deep sea». *Deep-Sea Research* 14 (1967): 65-78.
- JANNASCH, H. W., y M. J. MOTTL. «Geomicrobiology of deep-sea hydrothermal vents». *Science* 229 (1985): 717-725.
- KARL, D. M., C. O. WIRSEN, y H. W. JANNASCH. «Deep-sea primary production at the Galapagos hydrothermal vents». *Science* 207 (1980): 1345-1347.
- KOJIMA, S. «Deep-sea chemoautotrophy-based communities in the northwestern Pacific». *Journal of Oceanography* 58 (2002): 343-363.
- KOSLOW, J. A., K. GOLETT-HOLMES, J. K. LOWRY, T. O'HARA, G. C. B. POORE, y A. WILLIAMS. «Seamount benthic macrofauna off southern Tasmania: Community structure and impacts of trawling». *Marine Ecology Progress Series* 213 (2001): 111-125.
- LEVIN, L. A. «Oxygen minimum zone benthos: adaptation and community response to hypoxia». *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 41 (2003): 1-45.
- LEVIN, L. A. «Ecology of cold seep sediments: interactions of fauna with flow, chemistry and microbes». *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 43 (2005): 1-46.
- LONSDALE, P. «Clustering of suspension-feeding macrobenthos near abyssal hydrothermal vents at oceanic spreading centers». *Deep-Sea Research* 24 (1977): 857-863.
- MCCAVE, I. N. «Sedimentary settings on continental margins – an overview». En G. Wefer, D. S. M. Billett, D. Hebbeln, B. B. Jorgensen, M. Schluter y T. C. E. Van Weering. *Ocean margin systems. Hanse conference report*. Berlín: Springer, 2002, 1-14.
- MURRAY, J., y J. HJORT. *The depths of the ocean*. Londres, 1912.
- O'DOR, R., y V. A. GALLARDO. «How to Census Marine Life: ocean realm field projects». *Scientia Marina* 69, supl. 1 (2005): 181-199.

- PAULL, C. K., B. HECKER, R. COMMEAU, R. P. FREEMAN-LYNDE, C. NEUMAN, W. P. CORSO, S. GOLUBIC, J. E. HOOK, J. E. SIKES, y J. CURRAY. «Biological communities at the Florida Escarpment resemble hydrothermal vent taxa». *Science* 226 (1984): 965-967.
- ROGERS, A. D. «The biology of seamounts». *Advances in Marine Biology* 30 (1994): 305-350.
- ROGERS, A. D. «The role of the oceanic oxygen minima in generating biodiversity in the deep sea». *Deep-Sea Research II* 47 (2000): 119-148.
- SARDÀ, F., J. B. COMPANY, y A. CASTELLÓN. «Intraspecific aggregation structure of a shoal of a western Mediterranean (Catalan coast) deep-sea shrimp, *Aristeus antennatus* (Risso, 1816), during the reproductive period». *Journal of Shellfish Research* 22 (2003): 569-579.
- SHANK, T. M., R. A. LUTZ, y R. C. VRIJENHOEK. «Miocene radiation of deep-sea hydrothermal vent shrimp (Caridea: Bresiliidae): evidence from mitochondrial Cytochrome Oxidase subunit I». *Molecular Phylogenetics and Evolution* 13 (1999): 244-254.
- SHILLITO, B., D. JOLLIVET, P. M. SARRADIN, P. RODIER, F. LALLIER, D. DESBRUYÈRES, y F. GAILL. «Temperature resistance of *Hesiolyra bergi*, a polychaetous annelid living on deep-sea vent smoker walls». *Marine Ecology Progress Series* 216 (2001): 141-149.
- SIBUET, M., y K. OLU. «Biogeography, biodiversity and fluid dependence of deep-sea cold-seep communities at active and passive margins». *Deep-Sea Research II* 45 (1998): 517-567.
- SMITH, C. R., H. KUKERT, R. A. WHEATCROFT, P. A. JUMARS, y J. W. DEMING. «Vent fauna on whale remains». *Nature* 341 (1989): 27-28.
- SMITH, C., y A. BACO. «The ecology of whale falls at the deep-sea floor». *Oceanography and Marine Biology Annual Review* 41 (2003): 311-354.
- STUART, C. T., M. A. REX, y R. J. ETTER. «Large-scale spatial and temporal patterns of deep-sea benthic species diversity». En P. A. Tyler, ed. *Ecosystems of the deep oceans. Ecosystems of the world*. Ámsterdam: Elsevier, 2003, 295-311.
- TUNNICLIFFE, V., A. G. MCARTHUR, y D. MCHUGH. «A biogeographical perspective of the deep-sea hydrothermal vent fauna». *Advances in Marine Biology* 34 (1998): 353-442.
- TYLER, P. A. «Seasonality in the deep-sea». *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 26 (1988): 227-258.
- VAN DOVER, C. L., y B. FRY. «Microorganisms as food resources at deep-sea hydrothermal vents». *Limnology and Oceanography* 39 (1994): 51-57.
- VAN DOVER, C. L., C. R. GERMAN, K. G. SPEER, L. M. PARSON, y R. C. VRIJENHOEK. «Evolution and biogeography of deep-sea vent and seep invertebrates». *Science* 295 (2002): 1253-1257.
- WIGHAM, B., P. A. TYLER, y D. S. M. BILLETT. «Reproductive biology of the abyssal holothurian *Amperima rosea*: an opportunistic response to variable flux of surface derived organic matter?». *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 83 (2003): 175-188.
- WOLLAST, R. «Continental margins: Review of geochemical settings». En G. Wefer, D. S. M. Billett, D. Hebbeln, B. B. Jorgensen, M. Schluter y T. C. E. Van Weering. *Ocean margin systems. Hanse conference report*. Berlín: Springer, 2002, 15-31.
- YARINCIK, K., y R. O'DOR. «The Census of Marine Life: goals, scope and strategy». *Scientia Marina* 69, supl. 1 (2005): 201-208.
- YOUNG, C. M., E. VÁZQUEZ, A. METAXAS, y P. A. TYLER. «Embryology of vestimentiferan tube worms from deep-sea methane/sulphide seeps». *Nature* 381 (1996): 514-516.

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS E ILUSTRACIONES

Foto 3.1:	<i>Anoplogaster cornuta</i> , pez abisal del Atlántico. © David Shale/naturepl.com	64
Foto 3.2:	El gusano tubícola gigante <i>Riftia pachyptila</i> , de las fuentes hidrotermales del Pacífico este. © D. Desbruyères/IFREMER	67
Foto 3.3:	Corales de profundidad observados con el ROV francés <i>Victor 6000</i> a 1.650 m de profundidad en el Atlántico nordeste. © K. Olu/IFREMER-Caracole	71
Foto 3.4:	Fumarola negra en la dorsal atlántica. © K. Haase/MARUM- University of Bremen	75
Foto 3.5:	Gasterópodos de las fuentes hidrotermales de la cuenca de Lau, en el Pacífico oeste. © C. Fisher/PSU	76
Foto 3.6:	Cangrejos galatéidos de las fuentes hidrotermales del Pacífico. © R. Lutz ..	76
Foto 3.7:	Comunidad de mejillones del género <i>Bathymodiolus</i> en las surgencias frías del Golfo de México. © Ian MacDonald/Texas A&M-Corpus Christi Univ.	78
Foto 3.8:	Gusanos tubícolas <i>Lamelibrachia</i> de las surgencias frías del Golfo de México. © C. Fisher/PSU	79
Foto 3.9:	Esqueleto de ballena colonizado por una capa de bacterias en el fondo marino. © C. Smith/University of Hawaii	80
Foto 3.10:	El TOBI (Towed Ocean Bottom Instrument) es uno de los sonares de barrido lateral del Reino Unido utilizados para obtener mapas acústicos del fondo marino profundo. © Eva Ramírez Llodra/NOC Southampton	82
Foto 3.11:	Algunos ejemplos de sumergibles tripulados y vehículos operados por control remoto de la flota internacional utilizados en el estudio de las profundidades marinas. A: © H. Luppi/NOCS; B: © D. Desbruyères/IFREMER; C: © Gouillou/IFREMER; D: © Bremen University; E: © Eva Ramírez Llodra/HBOI; F: © C. German/WHOI	84
Foto 3.12:	Foto 3.12. El vehículo submarino autónomo <i>ABE</i> del Instituto Oceanográfico Woods Hole, EE. UU. © C. German/WHOI	85
Cuadro 3.1.	Listado de sumergibles tripulados (SUB) y vehículos operados por control remoto (ROV) utilizados en el estudio actual de los ecosistemas quimiosintéticos	83
Mapa 3.1:	Mapa batimétrico de una sección del Mediterráneo occidental donde puede observarse el sistema de cañones	70
Mapa 3.2:	Sistema de dorsales oceánicas, donde se muestran las regiones biogeográficas de las fuentes hidrotermales	77

NOTA SOBRE LOS AUTORES

David Billet lidera el Grupo DEEPSEAS del Centro Oceanográfico Nacional (NOC) en Southampton, Reino Unido. Su labor investigadora se centra en los efectos del cambio climático en los ecosistemas de los fondos oceánicos, en la biodiversidad de los ecosistemas del margen continental y de las llanuras abisales, y en cómo aplicar nuestros conocimientos de la ecología béntica a la gestión de los recursos marinos.

e-mail: dsmb@noc.soton.ac.uk

Eva Ramírez Llodra divide su trabajo de investigación entre el Instituto de Ciencias del Mar (CMIMA-CSIC) en Barcelona y el Centro Oceanográfico Nacional (NOC) en Southampton, Reino Unido. Sus principales áreas de interés son los patrones reproductores y la ecología larvaria de especies pelágicas, con atención especial a las condiciones que rigen el funcionamiento de estas comunidades, su distribución geográfica y los efectos de la creciente presión antropogénica en un ecosistema tan poco conocido.

e-mail: ezr@icm.csic.es