

La exploración de los fondos oceánicos: 160 años de investigación

Sea floor exploration: 160 years of research

THIERRY JUTEAU

Profesor emérito de la Universidad de Brest. Calle parque 1, 3^ºD, 20010 San Sebastian, Guipuzcoa. E-mail: thierry.juteau@telefonica.net

Resumen Este artículo cuenta cómo el ingenio humano consiguió vencer tremendas dificultades para explorar y conquistar los fondos oceánicos más profundos. Desde hace 160 años, cuando M. Maury (1855) elaboró el primer mapa batimétrico del Atlántico norte, se ha llevado a cabo esta conquista en varias etapas: (1) organización de grandes expediciones científicas con barcos-laboratorios, iniciada con la campaña de la corbeta inglesa Challenger (1872-1876), (2) introducción de los sonares a partir de 1918, (3) primeras inmersiones profundas con la Bathysphere de Beebe y Barton (1930-34), (4) conquista de las fosas más profundas del Pacífico oeste con los batiscafos FNRS III y Trieste del suizo Auguste Piccard, y el batiscafo francés Archimède, (5) llegada de los pequeños sumergibles y de los barcos perforadores con el programa internacional DSDP-ODP-IODP (1968-2014), y (6) desde los años 1990, la llegada de varios tipos de vehículos submarinos más o menos autónomos y robotizados. ¡El camino recorrido hasta hoy desde la mitad del siglo XIX es realmente impresionante! Cada avance tecnológico provocó una avalancha de nuevos datos de gran interés. Pero apenas hemos explorado el 2 o 3% de los fondos oceánicos. Inmensas áreas oceánicas inexploradas e inmensos recursos económicos están escondidos en el océano profundo.

Palabras clave: Barcos perforadores, batiscafos, corteza oceánica, fondos oceánicos, sumergibles profundos, vehículos submarinos

Abstract *This paper shows how human skills have overcome tremendous difficulties in order to explore and conquer the deepest areas of the oceanic seafloor. In the past 160 years, say, since M. Maury's first bathymetric map of the north Atlantic, some of the main steps of this conquest have been, for instance: the organization of scientific expeditions with oceanographic ships, beginning with the famous campaign of the HMS Challenger (1872-1876); the introduction of sonars aboard ships since 1918; the first deep diversions with Beebe's and Barton's Bathysphere; the conquest of the deepest trenches of the western Pacific with the bathyscaphs FNRS III and Trieste invented by the Swiss August Piccard, and with the French bathyscaph Archimède: the arrival of small deep sea submersibles and of the drilling ships, with the international programme DSDP-ODP-IODP (1968-2014), and since the 1990s, the arrival of various types of submarine vehicles, more or less autonomous and robotized. Each technological step forward led to an avalanche of new data of outstanding importance. And yet, we have only explored 2 to 3% of the deep seafloor! Immense oceanic areas remain to be explored, and immense economic resources remain hidden in the deep ocean.*

Keywords: Bathyscaphs, deep seafloor (conquest), deep submersibles, oceanic crust, submarine vehicles

El océano mundial cubre más del 70% de la superficie de nuestro planeta, con una profundidad media alrededor de 4000 metros. Esto hace de la Tierra *un planeta único en el sistema solar*. Se puede decir que hoy en día conocemos mejor la superficie de algunos de nuestros vecinos del Sistema Solar que la superficie de nuestro propio planeta, porque

su mayor parte se encuentra escondida bajo kilómetros de agua (Juteau, 1993).

Hace apenas cincuenta años no sabíamos prácticamente nada de la geología de los fondos oceánicos. El propósito de este artículo es contar cómo el ingenio humano consiguió vencer poco a poco los numerosos obstáculos que parecían infranqueables, y cómo se han encontrado en el fondo de los

océanos las claves para la comprensión de muchos aspectos de la geología moderna. Estas aportaciones pretenden poner en valor la geología oceánica en las aulas de Ciencias de la Tierra.

EL OCÉANO PROFUNDO: UN MEDIO HOSTIL

Durante muchos siglos, el ser humano ha navegado sobre los mares y océanos sin preocuparse por los fondos marinos. Empezaron por una larga y paciente conquista de la geografía de los océanos y continentes. Entre los siglos XV y XIX, la mejora de la precisión de la cartografía general del planeta fue impresionante. Sin embargo, la dimensión vertical de los océanos había sido ignorada. Los abismos marinos, *totalmente inaccesibles*, daban lugar a numerosos mitos, poblados de monstruos acuáticos que vivían en la oscuridad y el frío.

El océano profundo es un medio hostil al ser humano, más inaccesible quizás que la superficie de la Luna. Sus características físicas y químicas pueden sorprender a quien desee profundizar en su conocimiento y, sin duda, a quien quiera explorarlo. Se trata de:

- Un medio inmerso en la oscuridad total a partir de 300/400 metros de profundidad.
- Un medio frío, cerca de 0°C a partir de 2000 metros.
- Un medio químicamente muy corrosivo.
- Pero sobre todo, un medio *aplastado* por el aumento de la presión hidrostática: una atmósfera/cm² cada diez metros! 300 atmósferas a 3000 metros, 1000 atmósferas a 10000 metros.

Las radiaciones luminosas procedentes del Sol se propagan en el océano en función de las propiedades fisicoquímicas del agua y de las características físicas de la luz. Su penetración también tiene que ver, por supuesto, con el ángulo con el que inciden los rayos, dependiendo de la latitud, estación y hora del día.

El agua marina actúa como un filtro para las radiaciones de las distintas longitudes de onda que constituyen la luz solar. Así, por ejemplo, las radiaciones rojas y anaranjadas del espectro son absorbidas más rápidamente que las verdes, las azules y las violetas. Este efecto conlleva que en aguas profundas el extremo rojo del espectro esté ausente mientras el verde-azul se hace más visible.

El valor medio de penetración de la luz en el océano es de unos 200 metros. En las aguas con pocas sustancias o microorganismos que limiten su transparencia, las radiaciones azules son las que penetran a mayor profundidad. Pueden llegar a alcanzar los 400 metros (o incluso más en el Caribe, Mediterráneo o Atlántico). En mares con mayor turbidez son las radiaciones verdes y amarillas las que más pueden penetrar, llegando a las primeras a 200 metros, y las segundas a 100 metros, mientras que las rojas-anaranjadas y las violetas solamente alcanzan, como mucho, los primeros 20 metros. A profundidades superiores a 400 metros, la oscuridad del agua oceánica es equivalente a la de la noche menos iluminada.

Aunque el océano tiene otras fuentes de calor, su principal influencia térmica se encuentra en la insolación. Por ello, a medida que aumenta la pro-

fundidad, penetran menos las radiaciones y la temperatura de las aguas marinas disminuye.

En los niveles más superficiales se encuentra una capa de agua relativamente caliente. Con una temperatura bastante uniforme entre los 20 y los 200 metros. Por debajo de este valor medio se sitúa una zona de cambio, llamada *termoclina* a partir de la cual la temperatura presenta un rápido descenso, separando las aguas superficiales, menos densas y menos salinas, de las aguas más profundas, más frías, densas y salinas. La posición de la termoclina varía en función de la latitud.

A partir de los 1500 metros de profundidad, la temperatura del agua puede ser menor de 4°C. A profundidades superiores el agua puede alcanzar temperaturas inferiores a 2°C y acercarse a los 0°C o presentar, ocasionalmente, valores ligeramente negativos que no llegan a producir hielo debido a la presión y que sitúa el punto de congelación del agua salada en valores inferiores a -1,33°C.

El agua marina contiene en disolución gran cantidad de elementos químicos y compuestos. En su mayor parte son sales, metales y gases. La concentración total de solutos recibe el nombre de salinidad y suele expresarse en ‰. La composición de las aguas oceánicas las hace muy reactivas, especialmente respecto a los metales originando intensos procesos de corrosión.

A causa de la presión hidrostática de la columna de agua, en el océano la presión aumenta con la profundidad a razón, aproximadamente de una atmósfera (1 atm = 101325 Pa = 1,01325 bar) cada 10 metros de descenso. Dado que la profundidad media de los océanos es de unos 4.000 metros, la presión a esas profundidades es de unas 400 atmósferas. En algunas fosas marinas donde las profundidades superan los 11.000 metros, la presión puede superar las 1.000 atmósferas. Los organismos que habitan las profundidades deben soportar esos valores. También, claro está, lo hacen los batiscafos ideados por el ser humano para investigar esos abismos. Tanto las formas de vida como los instrumentos deben resistir, además, las extraordinarias variaciones de presión que sufren en sus desplazamientos verticales.

Éste es el escenario que la investigación del océano profundo ha encontrado, de la mano del progreso tecnológico. En los siguientes apartados se relatan los episodios más destacados de esta difícil conquista.

EL PRIMER MAPA BATIMÉTRICO

Hubo que esperar hasta la mitad del siglo XIX para obtener el primer mapa batimétrico, realizado por el oficial de marina americano **Mathew Maury** en 1855 en el Atlántico Norte. Sus estudios sirvieron de base para la realización de un proyecto grandioso: colocar el primer cable telegráfico entre Europa y Estados Unidos. Desde la invención del telégrafo por el físico americano Samuel Morse en 1843, y la inauguración de la primera línea telegráfica entre Baltimore y Washington en 1844, surgió la idea de unir continentes lejanos por el telégrafo, lo que suponía atravesar fondos océanos totalmente des-

conocidos. ¡Aquí estaba el gran reto! *Había que obtener mapas batimétricos de los fondos del Océano Atlántico, si se quería colocar un cable entre Europa y América* (Vanney, 1993).

En aquellos tiempos, tomar una medida de profundidad en el océano desde un barco era una operación que consumía mucho tiempo y, además, con resultados dudosos. Había que bajar una cuerda lastrada por un peso metálico (plomo o hierro) hasta que tocara el fondo. Se suponía que la profundidad correspondía a la longitud de la cuerda sacada. La operación duraba horas y, mientras tanto, las corrientes y los vientos podían apartar el barco de su posición inicial, de tal manera que el cable se apartaba de la posición vertical, y la profundidad se sobreestimaba. Además, el momento preciso de tocar el fondo era difícil de averiguar cuando en el fondo había lodo sedimentario poco denso: el peso metálico de la sonda podía hundirse en el lodo sin que nadie lo notara.

A pesar de esas dificultades, Maury consiguió con un número reducido de estaciones de medida, un mapa batimétrico del Atlántico Norte (Fig.1), donde apareció por primera vez la elevación central de la dorsal centro-atlántica: la bautizaron como *“the Telegraph Middle Gound”*. La aparición de este relieve central fue una inmensa sorpresa para la época porque la opinión generalizada era que los océanos tenían la forma de una cuenca, con una profundidad máxima en la parte central.

El primer cable telegráfico transatlántico, de 3.200 kilómetros de longitud, unió Irlanda con Terranova en 1858, y se rompió en seguida! Ocho años después, en 1866, una nueva línea más duradera fue instalada. Durante esta operación, se descubrieron fondos de más de 5.000 metros entre los dos continentes.

¿HASTA QUE PROFUNDIDAD HAY VIDA?

El interés del mundo científico se dirigió entonces, por primera vez, hacia las profundidades oceánicas, y surgió una controversia sobre los límites de la vida. Según el biólogo inglés Edward Forbes, la vida era imposible más allá de 300 brazas, o sea 550 metros. El científico se basaba en una serie de dragados efectuados por él en el mar Egeo, a profundidades crecientes: observó que los animales recogidos que vivían en el fondo (peces, invertebrados) eran cada vez menos numerosos cuando la profundidad aumentaba. Se paró a 130 brazas, o sea a 238 metros, y dibujó una curva de disminución del número de animales con la profundidad. No vaciló en extrapolar esta curva de manera puramente teórica, estimando en 300 brazas la profundidad donde toda vida desaparecía: aquí empezaba, según él, la *“zona azoica”*.

Esta teoría fue desmentida rápidamente por varios hallazgos de faunas profundas hasta 850 m. Y en 1860, en el Mediterráneo, un cable telegráfico submarino entre Cerdeña y Argelia, elevado desde 2.180 metros de profundidad para hacer una reparación, llevaba fijados en él un coral solitario, gusanos en tubos calcificados y varios bivalvos. ¡La *“zona azoica”* de Forbes ya no tenía sentido!

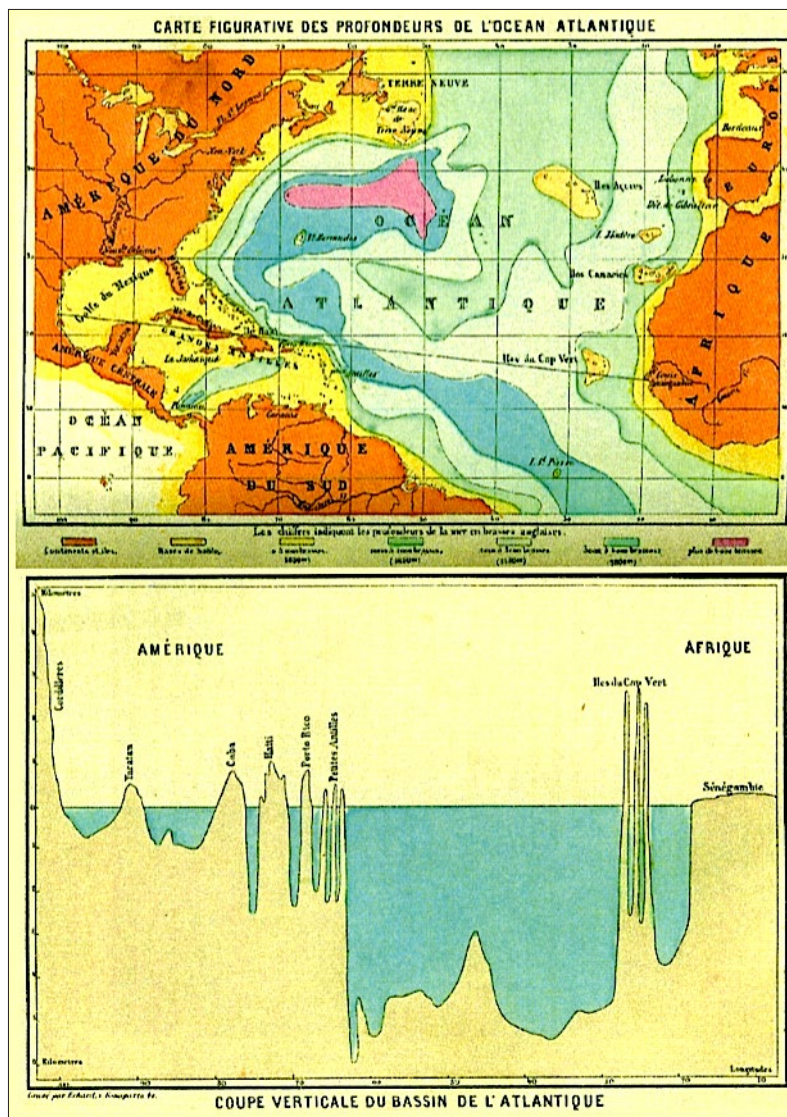


Fig.1. Mapa del Atlántico Norte y perfil batimétrico, por Mathew Maury (1855), publicado por el francés Figuier (1864). El perfil pasa por las islas del Caribe y de Cabo Verde.... ¡y por la dorsal centro-atlántica!

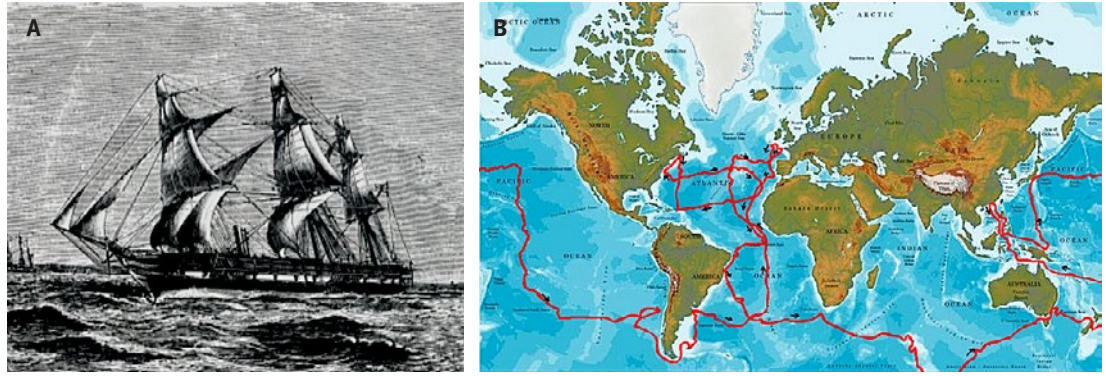
LAS PRIMERAS CAMPAÑAS OCEANOGRÁFICAS CIENTÍFICAS

El biólogo inglés **Charles Wyville Thomson** pensaba que el océano profundo había permanecido intacto desde la era secundaria, y que numerosas especies marinas *“fósiles”* podían haberse refugiado en las profundidades de los océanos durante los cambios geológicos de la era terciaria. Para verificar esta hipótesis, Wyville Thomson organizó la primera gran campaña de exploración de los fondos oceánicos con la corbeta inglesa **HMS Challenger**, un magnífico velero y *steamer* (Fig. 2A), que recorrió todos los océanos del globo en una fantástica expedición que duró cuatro años (1872-1876).

Esta expedición marcó el principio de la oceanografía científica moderna. A continuación se relatan algunos de sus logros:

- Recorrió 120.000 km, equivalente a tres veces la circunferencia de la Tierra (Fig. 2B).
- Efectuó 362 estaciones de medida en todos los océanos del globo; cada estación incluía la medida de la profundidad del agua, la dirección de las corrientes en la superficie y a varias profun-

Fig.2. A. Dibujo de la corbeta HMS Challenger. B. El recorrido de la expedición HMS Challenger (1872-1876).



didadas, la recogida de muestras de sedimentos del fondo, la medida de la temperatura del agua, y la recogida de muestras del agua de fondo y de organismos vivos a varias profundidades.

- Recogió y describió más de 400 especies animales y vegetales nuevas, entre las cuales 1.500 se recogieron a más de 6.000 metros de profundidad, y estudió la composición del plancton entre 0 y 100 metros de profundidad.
- Demostró que la vida existe en los fondos más profundos (Foraminíferos recogidos a 7.200 metros en la fosa de Japón).
- Demostró la ausencia de «fósiles vivientes» en las profundidades: este último dato fue una decepción para Thomson, pero reconoció que su hipótesis era errónea.
- Descubrió los nódulos de manganeso en las llanuras abisales del Atlántico central, a 5.000 metros de profundidad, y confirmó la existencia de una verdadera cordillera de montañas submarinas en medio del océano Atlántico. Escribe W. Thomson : «Una dorsal de 3.400 metros de altura atraviesa el Atlántico de Norte a Sur, siguiendo más o menos los contornos continentales del nuevo y del antiguo mundo...»
- Publicó sus resultados en 50 volúmenes, magníficamente ilustrados por los dibujos de esos naturalistas, que eran verdaderos artistas.

Otras campañas le sucedieron, entre las cuales hay que destacar las expediciones oceanográficas del príncipe **Alberto 1^o de Monaco** (de 1885 a 1915), a bordo de sus buques *Hirondelle I y II*, y *Princesse Alice I y II*. Le debemos la invención o puesta a punto de numerosas herramientas todavía utilizadas hoy en día para la recogida de muestras y de seres vivos del mar.

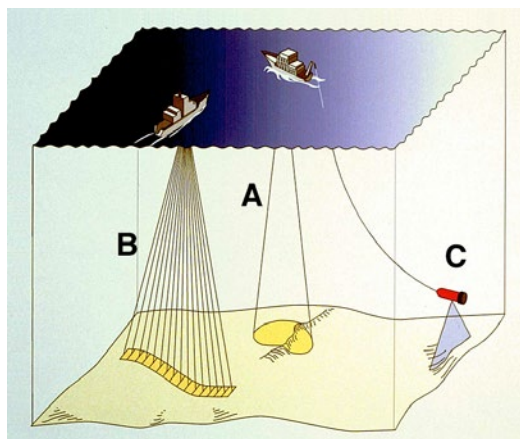


Fig.3. Esquemas de un sónar monohaz (A), un sónar multihaz (B), y un sónar lateral (C). En: Juteau & Maury (2012). Dibujo adaptado de Pierre Avérous (1981).

UNA REVOLUCIÓN TECNOLÓGICA: LA INVENCION DEL SÓNAR

El sueño de prescindir de la cuerda con lastre y medir en continuo la profundidad del océano por debajo de un buque se convirtió en realidad a principios del siglo XX.

La puesta a punto de la *tecnología del eco-sónar* se produjo durante la primera guerra mundial para detectar submarinos, y *revolucionó la cartografía de los fondos oceánicos*. En 1915 el físico francés Paul Langevin inventó un sistema de escucha para detectar submarinos. Las ondas sonoras, a diferencia de las ondas electro-magnéticas de luz o de radio, viajan muy lejos y a gran velocidad (1.500 m/s) por el agua, lo que las hace perfectas para inspeccionar las profundidades marinas.

El sónar significa “navegación por sonido” (*Sound Navigation and Ranging*), y su funcionamiento es parecido al del radar. El sónar emite una señal acústica mediante un emisor de ultrasonidos (por ejemplo, un cristal de cuarzo piezoeléctrico). Esa señal rebota al encontrar un obstáculo (el fondo oceánico, un submarino o un banco de peces), y es recogida por el emisor. La distancia D al objeto o al fondo oceánico viene dada por la fórmula $D = V \cdot t / 2$, donde V es la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en el agua de mar, y t el tiempo cronometrado entre emisión y recepción. Naturalmente, las cosas no son tan simples, ya que la velocidad del sonido en el agua del mar puede variar en función de la salinidad, de la temperatura y de la presión, y hay que corregir los datos brutos teniendo en cuenta esos parámetros.

Reservados inicialmente a los militares, los *sónares monohaz* acabaron equipando toda clase de buques civiles a partir de 1930, y sobre todo después de la segunda guerra mundial (Fig. 3A). Millares de perfiles batimétricos fueron así registrados año tras año, revelando poco a poco la gran complejidad de la topografía de los fondos oceánicos, en particular la extensión de la gran dorsal oceánica mundial, y las profundas fosas de subducción alrededor del Pacífico.

Más tarde (a finales de los años 70), aparecieron los *sónares multihaz*, capaces de cartografiar una franja continua de 20 km de ancho por debajo del buque oceanográfico (Fig.3B). También los *satélites altimétricos* han ayudado mucho a conocer la batimetría de los fondos oceánicos poco accesibles, por ejemplo en las zonas árticas. Por otra parte, los

sónares laterales, remolcados cerca el fondo, pueden tomar verdaderas fotos acústicas de los relieves submarinos (Fig. 3C).

1930: EMPIEZA LA CONQUISTA DE LAS GRANDES PROFUNDIDADES POR EL SER HUMANO

Hasta el año 1930, nadie se había atrevido a intentar una inmersión profunda en el océano. Todo lo que se sabía del océano profundo procedía de estudios realizados en buques oceanográficos.

Hartos de recoger animales pelágicos muertos y en mal estado en sus redes, dos biólogos marinos americanos, **William Beebe** y **Otis Barton**, hicieron construir una esfera de acero de 134 cm de diámetro y 38 mm de espesor, que pesaba 2,5 toneladas, que llamaron la «batesfera» (the *Bathysphere*). El objetivo era colgar la esfera en el extremo de un cable y bajarla hasta 1.000 metros o más de profundidad, para observar *in situ* la fauna batipelágica profunda en su medio natural.

Los dos valientes “batinautas” efectuaron 34 buceos en las aguas claras de las Bermudas, entre 1930 y 1934, llegando progresivamente de 240 metros a 908 metros de profundidad. A través de los tres ojos de buey de cuarzo fundido de la batesfera, observaron por primera vez los límites de penetración de la luz en el mar, con la desaparición progresiva de las frecuencias lentas (rojo, naranja, amarillo, verde,...), hasta la oscuridad total a partir de 300 metros. Más abajo, observaron fascinados todo un ecosistema pelágico desconocido, y cuando apagaban el foco, descubrieron que muchas especies emetían luz: fue el primer descubrimiento del fenómeno de la *bioluminiscencia* (Fig. 4).

¡Qué valor tenían estos dos científicos apasionados, quedándose horas de rodillas el uno contra el otro en un espacio tan reducido, colgados a un cable que, si se rompía, significaba su caída irremediable al abismo, y su muerte por aplastamiento!

No superaron los 908 metros de profundidad, porque ya estaban al límite de la resistencia del acero de la batesfera. Después de la segunda guerra mundial, **Barton** mandó construir una nueva esfera y buceó hasta 1.360 metros de profundidad, un récord prodigioso en esta época, pero también un límite infranqueable, debido al peso creciente del cable.

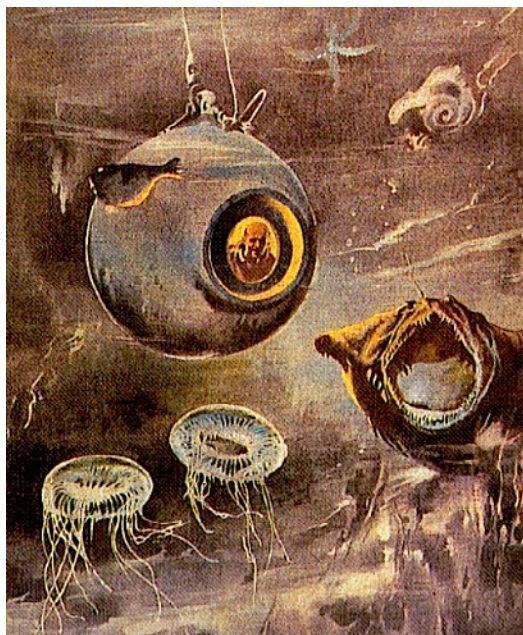


Fig.4. Dibujo de artista enseñando William Beebe en su «batesfera», admirando la fauna batipelágica profunda, cerca de las islas Bermudas (En: Reyss 1990, litografía publicada en *El Popolo*).

La conclusión era clara: *para llegar a mayor profundidad había que prescindir del cable de sustentación*, cortar el cordón umbilical con el buque-madre, e inventar un vehículo autónomo. ¿Significaba esto volver a los submarinos clásicos, como los militares? La respuesta es no, porque el sistema de lastre (*ballasts*) utilizado por estos aparatos no funciona a varios kilómetros de profundidad: para volver a la superficie, un submarino clásico expulsa el agua de mar acumulada en los *ballasts*, reemplazándolo por aire comprimido. Pero este sistema, sensible a la presión externa, se bloquea más allá de unos centenares de metros de profundidad.

Había que encontrar otro medio para equilibrar el peso de la esfera-habitáculo protegiendo a los pasajeros de la presión: la solución la encontró un genio de la exploración, el profesor suizo **Auguste Piccard** (Fig.5).

Después de haber alcanzado 17.000 metros en la estratósfera con un globo de su invención (el *FNRS I*) en el año 1931 (casi se muere durante esta hazaña), el profesor Piccard tuvo una idea genial: *transponer a la exploración submarina el principio del globo estratosférico* (Riffaud, 1988). Presentado en 1937, su «globo dirigible submarino» consiste en una esfera-

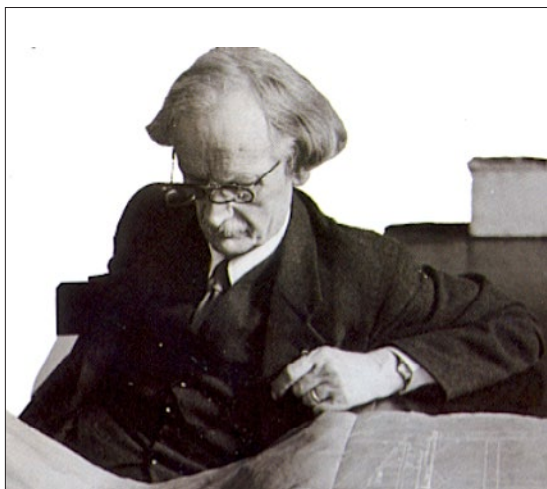
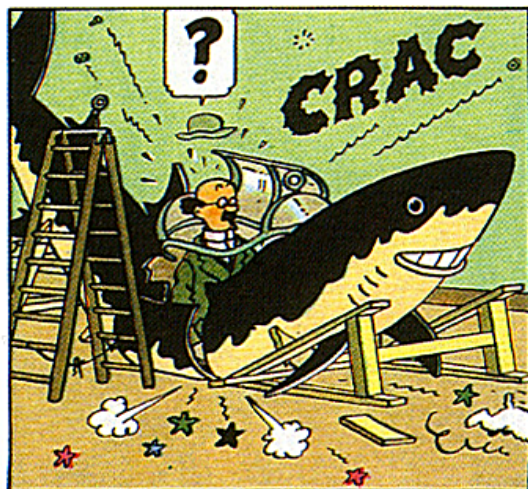


Fig.5. El profesor suizo Auguste Piccard sirvió de modelo a Hergé para dibujar el famoso profesor Tournesol, compañero de Tintin en sus aventuras.

Fig.6. Los batiscafos.
A. El batiscafo italiano-
americano Trieste. B.
El batiscafo francés
Archimède.



habitáculo muy pesada, sostenida por un enorme flotador lleno de gasolina, más ligera que el agua del mar. Para bajar, se rellenan unos *ballasts* con agua del mar, como en los submarinos clásicos, pero para subir, basta con soltar unos lastres metálicos para ascender como un globo hacia la superficie del mar.

El batiscafo **FNRS II**, acabado en 1948, buceó a 25 metros frente a las costas de Dakar en noviembre de ese mismo año con Auguste Piccard y Théodore Monod como pasajeros. Luego un modelo mejorado por la Marine nationale française en Toulon (Francia), el batiscafo **FNRS III**, pulverizó delante de Dakar, en 1954, el récord de Beebe y Barton: **14.050 metros** de profundidad!

Enfadado con la *Marine nationale* francesa, Auguste Piccard hizo construir en Trieste (Italia) un nuevo batiscafo llamado **Trieste**, mejorado después por la marina americana para poder alcanzar fondos de 11 km de profundidad (Fig. 6A). Con su esfera de dos metros de diámetro y 10 toneladas de peso, y su enorme «flotador» relleno por 110 toneladas de gasolina, **el batiscafo Trieste alcanzó 10.916 metros el 23 de enero 1960 en la fosa de las Marianas**, con **Jacques Piccard** (hijo de Auguste) y el oficial de la Marina americana **Don Walsh** a bordo. Este *récord absoluto de profundidad* sigue vigente hoy en día, y seguirá siéndolo para siempre, porque sabemos hoy que no hay fondos más profundos que éste! Como anécdota, hay que mencionar que cuando tocaron el fondo y encendieron los focos, los dos batinautas vieron un pez delante de sus narices: la vida, desde luego, ha conquistado “todo” el espacio oceánico, hasta el fondo de las fosas más profundas.

Mientras tanto, los franceses habían decidido la construcción de un batiscafo francés: el batiscafo **Archimède** fue inaugurado el 28 de julio 1961 en Toulon (Fig. 6B). ¡Llevaba un flotador con 171.000 li-

tros de gasolina! El **Archimède** alcanzó 9.545 metros de profundidad en la fosa de las Kuriles, el 25 de julio 1962. Esta fosa resultó menos profunda de lo previsto, y no se pudo superar el récord del *Trieste*.

No es casualidad que durante estos mismos años 1960 y 1961, rusos y americanos mandaran con éxito sus primeros astronautas al espacio: *fue igual de difícil para la humanidad llegar hasta los fondos más profundos del océano que liberarse de la atracción terrestre*.

AÑOS 1960: LA REVOLUCIÓN DE LA TECTÓNICA DE PLACAS

La década de los años 1960 fue prodigiosa: en el espacio acontecieron las hazañas de la NASA y la inolvidable pisada de Neil Amstrong sobre el *regolito* de la Luna; en oceanografía, la llegada de nuevas herramientas permitieron por fin a los geólogos acercarse a los fondos de los océanos, mientras la revolución conceptual de la teoría de la *tectónica de placas* arrasaba con todas las hipótesis y modelos previos.

Los nuevos datos geofísicos obtenidos en los océanos fueron determinantes. Primero, el admirable trabajo de compilación de millares de perfiles sónico por la americana **Marie Tharp** (Fig.7B), geofísica en el LDGO (Lamont-Doherty Geophysical Observatory) concluyó con la publicación, con su jefe **Bruce Heezen**, del primer mapa detallado y completo de los fondos oceánicos (1965). Por primera vez, podíamos contemplar la faz de nuestro planeta sin el agua del mar, con sus 60.000 km de dorsales oceánicas, sus numerosas fosas de subducción, sus cadenas de volcanes sumarinos, etc. (Fig. 7A). Además, las anomalías magnéticas de los fondos

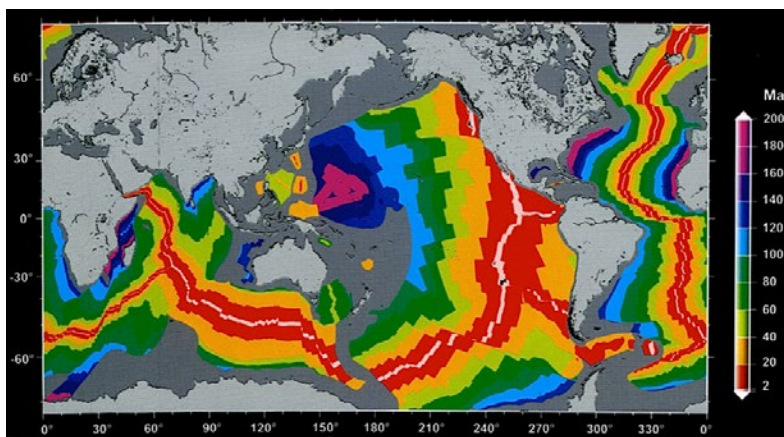
Fig.7. A. El primer mapa de los fondos oceánicos, publicado en Francia por Xavier Le Pichon, según los alzamientos batimétricos de Bruce Heezen y Marie Sharp (1965). La dorsal oceánica mundial aparece como la estructura fisiográfica mayor de nuestro planeta. B. Marie Sharp, en su laboratorio del Lamont Observatory.



oceánicos confirmaron la hipótesis de la *expansión de los fondos oceánicos* (Vine y Mathews, 1963), y revelaron también que la *velocidad de expansión* de la dorsal varía mucho, desde 1 cm/año hasta cerca de 20 cm/año (Fig. 8). Otra sorpresa inmensa fue la *juventud de la corteza oceánica*, cuyas zonas más antiguas, al pie de los continentes, no sobrepasan los 160 millones de años (Ma), mientras los núcleos más antiguos de los continentes rozan los 4.000 Ma.

La *dorsal oceánica mundial* apareció entonces como la *estructura fisiográfica más importante de nuestro planeta*: no lo sabíamos porque esta gigantesca cadena de volcanes submarinos, de más de 60.000 km de longitud, estaba totalmente escondida bajo varios kilómetros de agua. Marie Tharp señaló que la parte más alta de la dorsal está formada por una doble cresta en medio de la cual aparece una fosa, el *rift axial*. Es dentro de este estrecho *rift* donde la inyección continua de magma basáltico construye poco a poco la corteza oceánica, provocando la expansión simétrica del fondo del océano. Descubrió también que la dorsal estaba segmentada, y tenía numerosas *zonas de fractura*, discontinuidades rígidas y fijas que muchas veces atraviesan todo el océano.

Por otra parte, los perfiles s3naron en el Pac3fico oeste y este confirmaron la existencia de numerosas fosas muy profundas, que bordeaban los arcos volc3nicos o el continente americano. Entre las dos guerras mundiales, el gran geof3sico **Franz Andries Vening-Meinesz** hab3a pasado muchos a3os en submarinos de la Marina holandesa para medir con un p3ndulo el campo de gravedad encima de esas fosas, y hab3a demostrado *un enorme d3ficit de masa* en el flanco insular de los arcos de islas volc3nicas (Jap3n, Filipinas, y tambi3n Antillas e Indonesia): esas «*franjas de Vening-Meinesz*», con sus anomal3as gravim3tricas fuertemente negativas, coincid3an con los focos de terremotos muy violentos que se produc3an en esas islas. Entre 1931 y 1935, el geof3sico **Kiyoo Wadati** hab3a mostrado, ante la incredulidad de la comunidad cient3fica, que los focos de los terremotos que afectaban Jap3n eran m3s y m3s profundos hacia el oeste: era la prefiguraci3n de lo que llamamos hoy los «*planos de Wadati-Benioff*» y las *zonas de subducci3n*, parte integrante de la teor3a de la tect3nica de placas: la corteza oce3nica vuelve al manto profundo en estas zonas, que su-



man alrededor de 55.000 km de zonas de subducci3n, y esto explica su sorprendente juventud!

La publicaci3n del mapa detallado de la actividad s3smica mundial dibujaba los contornos de las placas tect3nicas (Fig. 9A), mientras los estudios s3smicos de la corteza oce3nica ense3aban una corteza oce3nica delgada (6-7 km), que consist3a en dos capas: la capa 2 bas3ltica, y la capa 3 de gabro (Fig. 9B).

A principios de los a3os 1970, toda la comunidad geol3gica se muere de impaciencia por ver de cerca y describir estos l3mites de placas, escondidos debajo de kil3metros de agua: la zona axial de la dorsal oce3nica, y las profundas fosas de subducci3n peri-Pac3ficas.

LA LLEGADA DE LOS PEQUE3OS SUMERGIBLES

Los batiscafos hab3an permitido batir r3cords de profundidad, y bucear hasta el fondo de las fosas marinas m3s profundas de nuestro planeta. Pero no eran aptos para explorar la geolog3a de los oc3anos: son demasiado grandes y demasiado pesados (hasta 200 toneladas), poco 3giles, incapaces de recoger muestras de rocas, y adem3s hay que remolcarlos, con todos los peligros que esto supone cuando el mar se embravece.

La experiencia adquirida con los batiscafos permiti3 a los ingenieros buscar nuevas soluciones y nuevos materiales para reducir el tama3o y el peso de los sumergibles de «gran profundidad». Primero,

Fig. 8. Mapa de las edades de la corteza oce3nica, basada sobre las anomal3as magn3ticas, y los datos DSDP/ODP. El espacio entre las l3neas isocronas refleja las variaciones de velocidad de apertura de la dorsal (Muller et al., 1997). Consultar la edici3n digital.

Fig. 9. A. El mapa de la actividad s3smica mundial (terremotos de magnitud >4,5, 1994-1997) dibuja los l3mites de las placas. Los terremotos superficiales (< 100 km) aparecen en rojo, los intermedios (de 100 a 300 km) en verde y los profundos (de 300 a 700 km) en azul (Mapa de Nataf y Sommeria, 2000). B. Perfil s3smico de la corteza oce3nica actual (a la derecha) y comparaci3n con la corteza f3sil de la ofiolita de Om3n (a la izquierda). Consultar la edici3n digital.

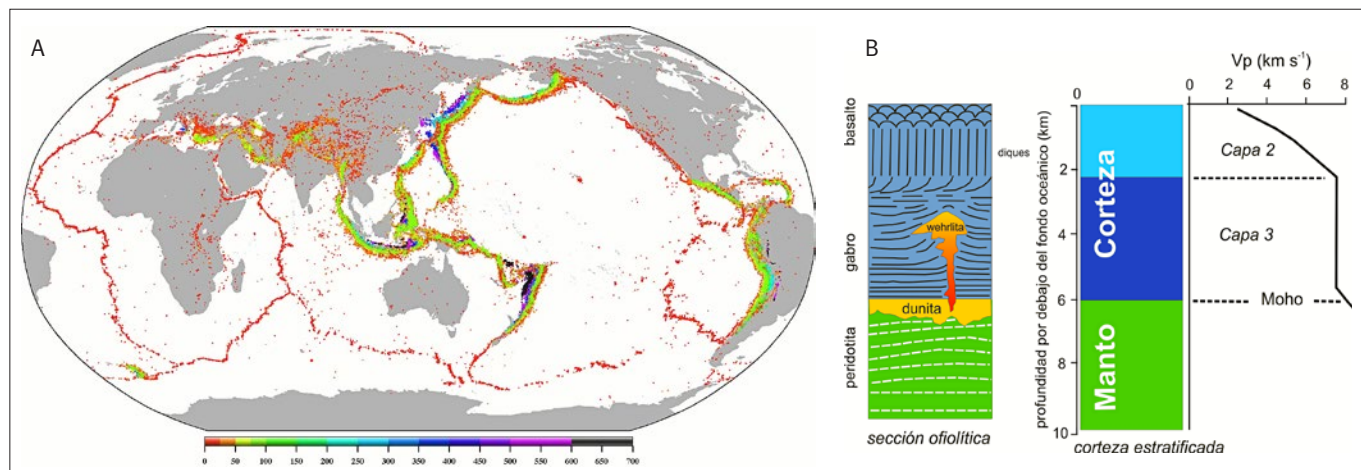
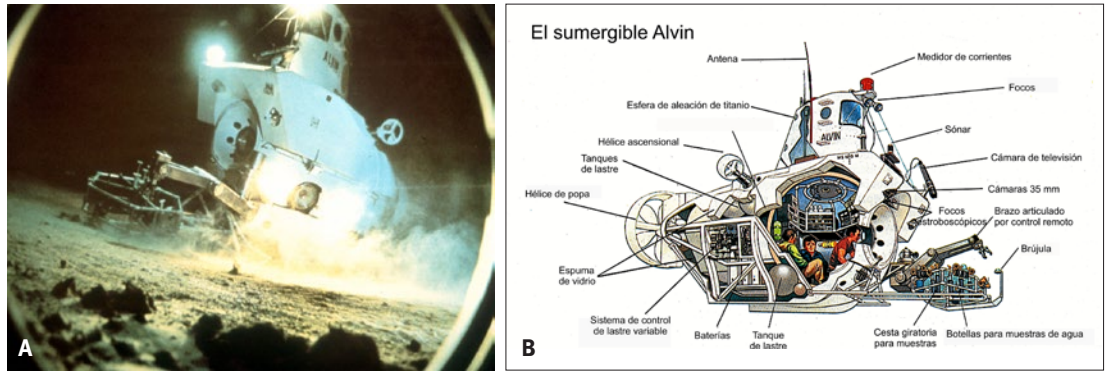


Fig. 10. El sumergible americano Alvin. A. Fotografado en el fondo, con los focos encendidos. Nótese el brazo telemanipulado y la cesta para recoger muestras. B. Esquema del Alvin (según B. Ballard, 1987)



se construyeron nuevas esferas más ligeras, que se limitaban a profundidades medias entre 3.000 y 6.000 metros. Pero el gran progreso fue la eliminación de los enormes «flotadores» de gasolina: las esferas fueron revestidas por un material ultraligero, una espuma de plástico sintética de densidad bajísima (0,70). Así nacieron esos maravillosos pequeños sumergibles que pesan menos de 20 tone-

ladas; herramientas muy esperadas por los geólogos para estudiar de cerca la geología de los fondos oceánicos profundos (Riffaud, 1988).

El primero de esta nueva generación de pequeños sumergibles autónomos fue el **Alvin** americano (Fig. 10A y B): construido en 1964, iestá hoy en día todavía activo! Con una limitación inicial situada en 2.000 metros de profundidad, una nueva esfera construida en una aleación de titanio en 1973 le permitió sin embargo alcanzar los 4.500 metros.

Unos años más tarde, en 1970, llegó el sumergible francés **Cyana** (Fig. 11A), limitado a 3.000 metros, muy ligero y ágil sobre el fondo con sus 9 toneladas, y por esta razón el preferido de los geólogos. Más tarde, en 1985, llegaría el sumergible francés **Nautilé**, el más sofisticado de todos (Fig. 11B): con su esfera de aleación de titanio y sus 20 toneladas, puede alcanzar 6.000 metros de profundidad, y explorar así el 97% de los fondos oceánicos profundos.

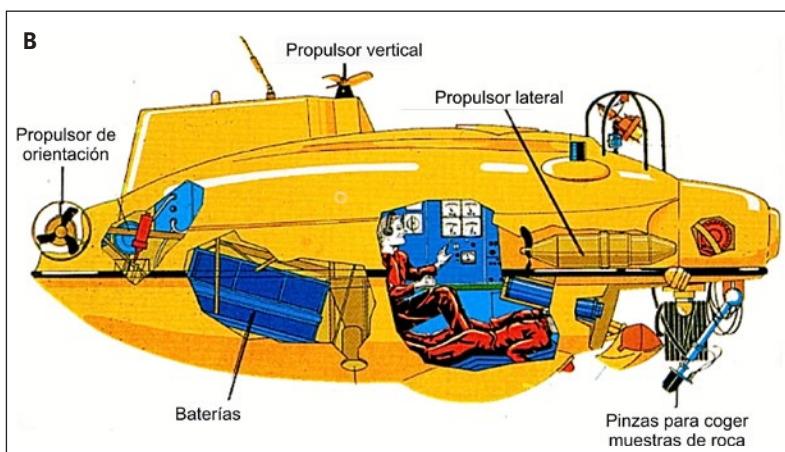
Por fin los geólogos podían «ir al campo» y estudiar de cerca, con todo detalle, los límites de placas bajo kilómetros de agua: la dorsal oceánica mundial y las fosas. Podían fotografiar y filmar de cerca los afloramientos, y recoger muestras de rocas, de sedimentos o de fluidos *in situ* sobre el fondo, gracias a los brazos tele-manipulados de los sumergibles. Hasta entonces, solo se podían recoger muestras de rocas por dragados a partir de los buques, un método primitivo y poco preciso, con los fragmentos de rocas arrancadas al fondo llegando desordenados a la superficie.

La expedición FAMOUS exploró, durante los veranos de 1973 y 1974, un segmento de la dorsal centro-Atlántica al Sur de los Azores, con tres sumergibles: el viejo batiscafo francés **Archimède**, y los sumergibles **Cyana** y **Alvin** (Riffaud y Le Pichon, 1976). Por primera vez, unos hombres pudieron explorar el rift axial de la dorsal a 3.000 metros de profundidad y observar de cerca sus volcanes de lavas almohadilladas, su tectónica de extensión activa y su sedimentación pelágica (Fig.12).

Unos años más tarde, el descubrimiento de la actividad hidrotermal de la dorsal del Pacífico, y de los ecosistemas hidrotermales profundos asociados, por los sumergibles **Alvin** (1977, 1979) y **Cyana** (1978), revolucionó la geología y la biología marinas. Tuve la gran suerte de participar en las campañas **Cyamex** (1978), con el sumergible **Cyana**, y **Rise** (1979) con el sumergible **Alvin**, y de hacer el primer buceo histórico sobre un grupo de «black smokers», con mi compañero americano **Bill Normark**, del US Geological Survey (Juteau,



Fig. 11. Los sumergibles franceses Nautilé (A) y Cyana (B).



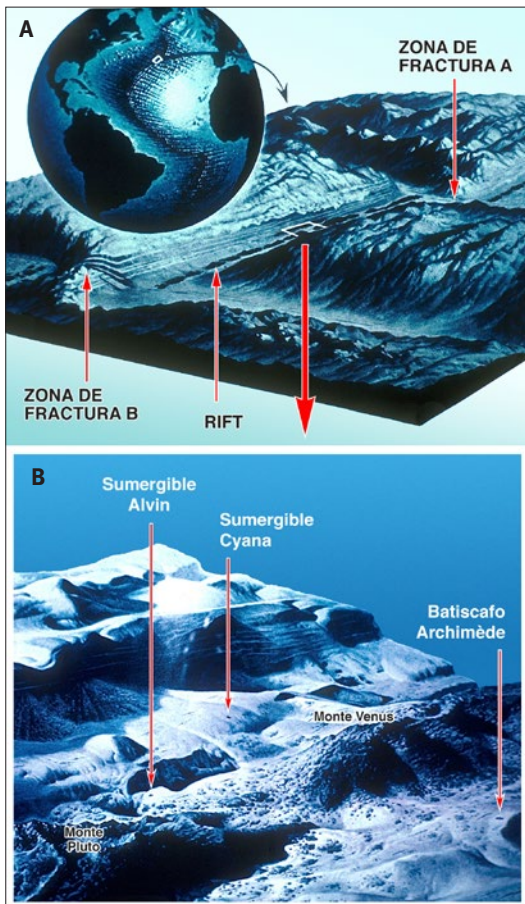


Fig. 12. Operación FAMOUS: primeros buceos profundos sobre el rift axial de la dorsal oceánica. A. Situación de la zona explorada, al Sur de las islas Azores. B. Dibujo de artista enseñando la zona explorada, con los tres sumergibles en el fondo (Copyright National Geographic Magazine, modificado). En: Riffaud y Le Pichon (1976).

1993). Nunca olvidaré el increíble espectáculo de los chorros de agua negra saliendo con fuerza a 350°C de chimeneas hechas de sulfuros polimetálicos, y rodeadas por una fauna hidrotermal proliferante, que se aglutinaba alrededor de las chimeneas (Fig. 13).

El ecosistema alrededor de esos puntos calientes era totalmente desconocido hasta finales de los años 70, cuando fueron descubiertos. Hoy en

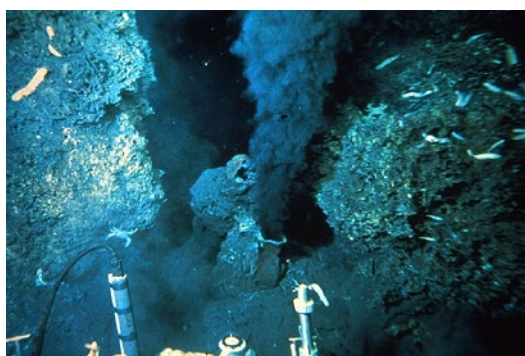


Fig. 13. Una foto histórica: el primer «black smoker» fotografiado sobre la dorsal del Pacífico a 23°N y 2.500 m de profundidad, con el autor de estas líneas a bordo del sumergible Alvin (campana RISE, 1979).



Fig. 14. La biomasa increíblemente densa de un oasis hidrotermal profundo (10kg/m²): se observan gusanos Riftia, cangrejos y peces.

día, más de 500 especies nuevas han sido descritas en este singular ecosistema (Fig. 14). Praderas de gusanos gigantes viviendo dentro de tubos blancos, colonias de bivalvos y de gasterópodos viven en simbiosis completa con bacterias anaerobias y quimiótrofas, que utilizan la energía liberada por la transformación química de H_2S o de CH_4 para sintetizar moléculas orgánicas a partir del CO_2 y de nutrientes salinos. Estos organismos fijados en el fondo o sobre las chimeneas sirven de alimento a centenares de especies sueltas como cangrejos, gambas, peces, pulpos, etc.

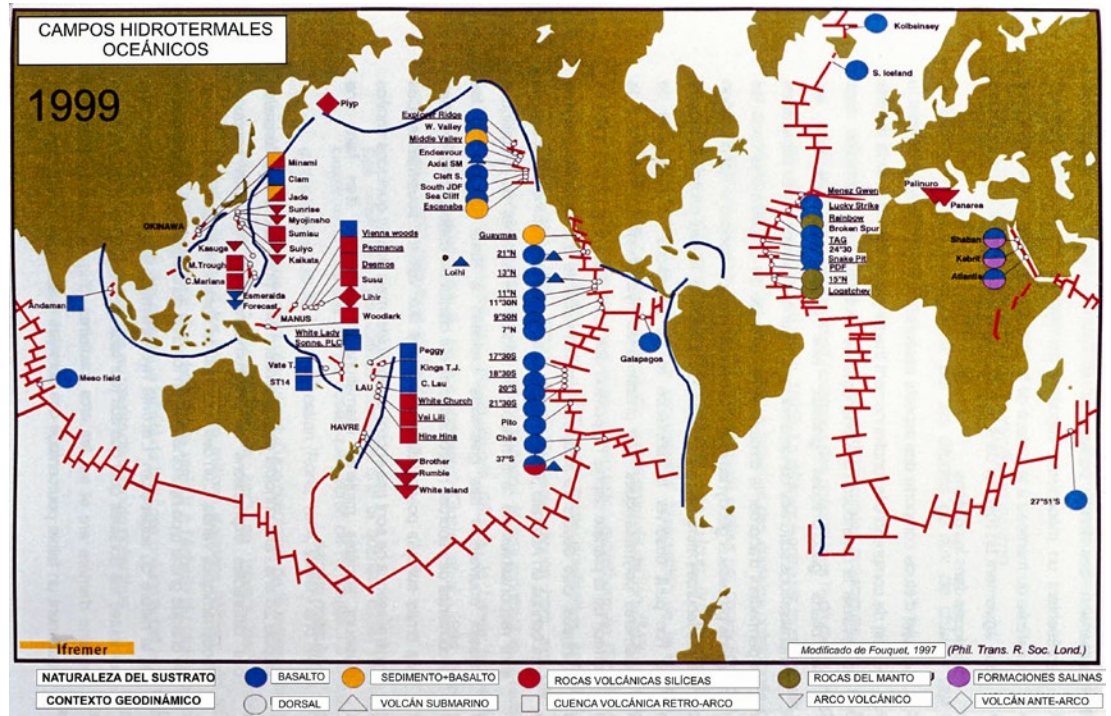
El descubrimiento de estos ecosistemas profundos ha abierto de nuevo el fascinante problema de los orígenes de la vida: el entorno de las fumarolas negras constituye claramente un sitio natural favorable para la aparición de la vida, y el descubrimiento de *Archaeobacterias*, con un ARN muy primitivo, podría confirmar esta hipótesis (Laubier, 1986, 1992).

Con el tiempo, esta actividad hidrotermal produce acumulaciones de millones de toneladas de minerales metálicos, que constituyen sin duda los yacimientos de metales del futuro. Los “Black



Fig. 15. Fragmento de chimenea hidrotermal, con su capa externa de anhidrita, y su canal interno tapizado de sulfuros polimetálicos (pirita, calcopirita y blenda). Foto de Yves Fouquet, Centre Ifremer de Brest.

Fig. 16. Distribución de los campos hidrotermales activos descubiertos con sumergibles entre 1979 y 1999. El color de los símbolos indica la naturaleza del sustrato, y sus formas, el contexto geodinámico (Yves Fouquet, Centre Ifremer de Brest, 1999). Consultar la edición digital.



smokers“ precipitan sulfuros polimetálicos, ricos en Fe, Cu, Zn, Co, Mn, Ba (Fig.15), con contenidos interesantes en Ni, Au, Ag, Pt y PGE.

El inventario de esos recursos económicos submarinos ya está haciéndose: veinte años después del primer buceo sobre un «black smoker», se han descubierto numerosos campos hidrotermales activos en la dorsal oceánica mundial y también en las cuencas retroarco (Fig. 16).

Los sumergibles también permitieron estudiar de cerca las características del vulcanismo submarino de gran profundidad. Bajo la presión de varios kilómetros de agua de mar, los gases no pueden vesicular, y se quedan disueltos en la lava basáltica. En consecuencia no hay explosiones ni brechas piroclásticas, solo coladas más o menos fluidas. Según la amplitud del caudal, esas coladas producen lavas almohadilladas (caudales moderados), coladas masivas y lagos de lava (caudales muy importantes). Hasta hoy, nadie ha podido ser testigo de una erupción a gran profundidad! Una expedición llegó con el sumergible americano Alvin unas horas después de una erupción en la dorsal del Pacífico, en el lugar que llamaron «Barbacoa» (toda la fauna hidrotermal estaba carbonizada, pero fue demasiado tarde para ver correr la lava).

LA LLEGADA DE LOS BUQUES PERFORADORES Y DEL PROGRAMA INTERNACIONAL DSDP

A finales de los años 60, una nueva y potente herramienta hizo su aparición en los océanos: el buque perforador **Glomar Challenger**. Con sus 122 metros de largo, 20 metros de ancho y 10.500 toneladas de peso, la silueta del buque-perforador, con su torre de sondeo de 61 metros de alto, fue rápidamente famosa en todos los puertos del mundo. Era la herramienta indispensable para obtener muestras de la corteza oceánica lejos de las dorsales, cuando está cubierta por una capa de sedimentos.

Alquilado por seis institutos oceanográficos americanos (la asociación JOIDES), el *Glomar Challenger* empezó a perforar los fondos oceánicos en 1968, dedicándose a verificar la hipótesis del «sea-floor spreading», o sea, la expansión de los fondos oceánicos a partir de las dorsales. La demostración fue brillante y concluyente: en diciembre de 1968 y en enero de 1969, el *Glomar Challenger* realizó una serie de sondeos sobre una sección transversal a la dorsal centro-Atlántica, entre 28° y 30° Sur (Sitios DSDP 14 a 22). Como se puede ver en el diagrama de la derecha de la Fig. 17, la correlación lineal es perfecta entre la edad paleontológica del primer sedimento depositado sobre la corteza basáltica y la distancia al centro de la dorsal.

Características del buque

Por debajo de la torre de sondeo de 60 metros de altura se halla la plataforma de sondeo (el rig), donde se juntan los tubos de 30 metros de longitud. La plataforma de sondeo corona un hoyo en el buque (el moonpool), por donde pasa el conjunto de tubos que bajan hacia el fondo del mar. En su extremo está equipado con un trépano de cuatro conos abrasivos. Un cono de reentrada instalado sobre el fondo permite el cambio de trépano gastado y la reocupación del pozo. Una baliza acústica inmersa al lado de la cabeza del sondeo permite al buque centrarse y permanecer sobre la vertical del pozo, y un sistema sofisticado situado arriba de la torre, el compensador de oleaje, desacopla el tren de tubos de los movimientos verticales del buque.

Un tubo metálico de 10 metros de largo, el core-catcher, situado justo detrás del trépano, recoge el testigo (el core, un cilindro vertical de roca de 6 cm de diámetro recortado por el trépano). Cada diez metros, el core-catcher es extraído desde dentro de la tubería hasta la plataforma para recuperar el testigo. Este último es seccionado en dos partes: una

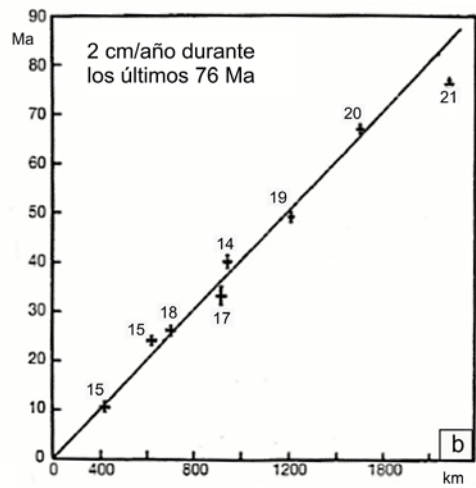
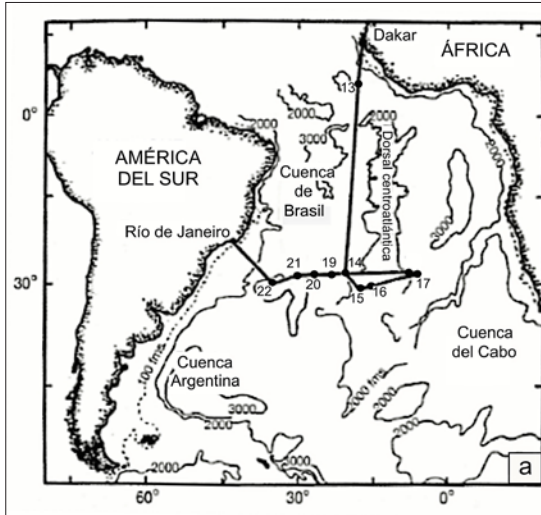


Fig. 17. Verificación de la hipótesis de la expansión del fondo oceánico por una serie de sondeos realizados con el buque-perforador *Glomar Challenger* en 1968. A la derecha, el diagrama muestra la correlación perfecta entre la edad de la corteza y la distancia a la dorsal. Se deduce una velocidad media de expansión de 2 cm/año.

mitad es inmediatamente archivada, mientras la otra sirve para tomar muestras a bordo para estudios de laboratorio.

Posición dinámica: durante las operaciones de perforación, es indispensable que el barco permanezca en la vertical del sondeo. Para ello, su distancia a una baliza acústica sumergida sobre el fondo al lado del pozo es mínima, como en la fig. 18. Si el barco empieza a derivar, la distancia a la baliza aumenta, la información es recogida por un ordenador que enciende los motores laterales necesarios para centrar de nuevo el barco en la vertical del pozo.

Operación de reentrada: cuando el trépano está gastado, hay que remontar todo el tren de tubos, cambiar el trépano y bajar de nuevo el tren de tubos hasta el cono de reentrada, gracias a una cámara de alta resolución que se desliza a lo largo de la tubería (Juteau y Maury, 2012).

El programa DSDP-ODP-IODP: emergencia de una comunidad científica internacional

Este programa de sondeos oceánicos profundos, bautizado **DSDP** (*Deep Sea Drilling Project*) se internacionalizó en 1974: Inglaterra, Francia, Alemania Federal, Japón y URSS entraron en el consorcio JOIDES, aportando financiación al proyecto. Cada país miembro podía proponer proyectos de sondeos, tenía delegados en los comités científicos (los *panels*), y tenía derecho a una cuota de científicos embarcados y de jefes de misión.

Entre 1974 y 1983, el *Glomar Challenger* hizo un total de 96 campañas de dos meses (llamadas *legs*), perforó 1.092 sondeos distribuidos en 624 sitios, recuperando 20.000 testigos de rocas y sedimentos que alcanzaron una longitud total de más de 100 km. Hizo perforaciones a todas profundidades, incluso hasta 7.000 metros en la fosa de las Marianas. Los informes de misión, los célebres *Blue Books* (*Initial Reports del DSDP*) constituyen una fabulosa base de datos multidisciplinar. Junto a las mitades archivadas de todos los testigos, son los archivos de los océanos del planeta.

Cada dos meses, un nuevo equipo científico de hasta 50 personas, subía a bordo del buque, con investigadores de todos los países miembros del

consorcio JOIDES. Así se constituyó, año tras año, una comunidad científica multidisciplinar, unida por la pasión de la exploración del océano profundo. Embarcar a bordo del *Glomar Challenger*, y luego del *Joides Resolution*, fue para numerosos jóvenes doctorandos e investigadores (y para mí), una experiencia inolvidable.

En 1985, el *Glomar Challenger* fue reemplazado por un nuevo buque perforador americano mucho más sofisticado, el *Joides Resolution*: 144 metros de largo, 21 metros de ancho, 17.000 toneladas de peso, equipado con una torre de sondeo de 61 metros de altura y capaz de hacer sondeos hasta 9.000 metros. El *Joides Resolution* es además un verdadero laboratorio flotante, con sus 1.100 m² de laboratorios repartidos en 7 pisos. El nuevo programa de sondeos profundos **ODP** (*Ocean*

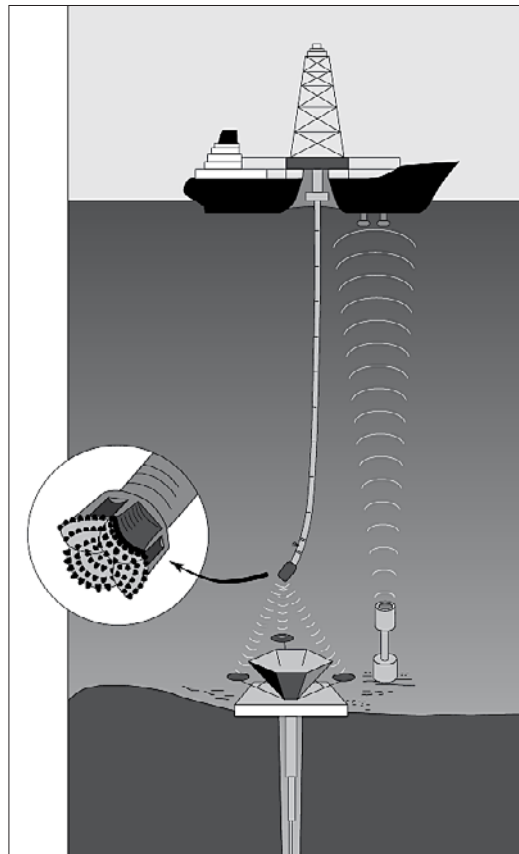


Fig. 18. El barco perforador, una maravilla tecnológica.

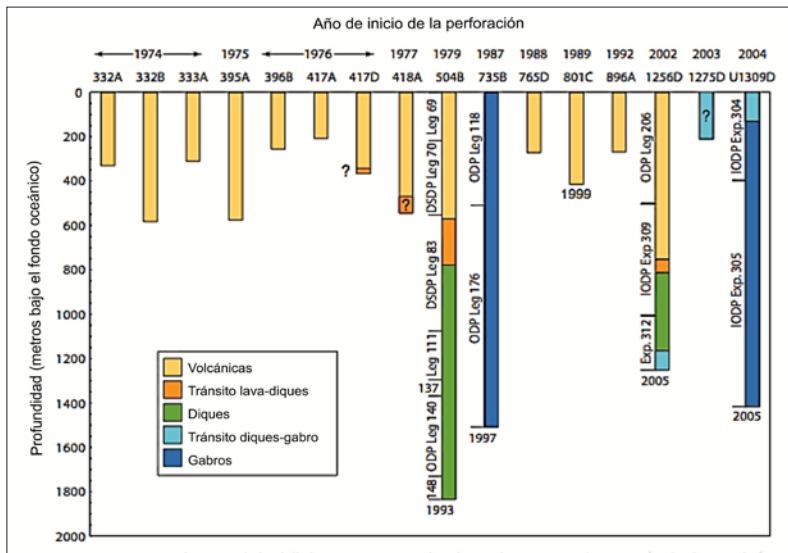


Fig. 19. Tabla de los sondeos de más de 200 m efectuados en la corteza oceánica en 30 años, por orden cronológico (1974-2004). En: Dick et al. (2006). Consultar la edición digital.

Drilling Programme) acogió nuevos países miembros (Canadá, Australia, Corea del Sur, China y un consorcio de 12 países europeos, incluyendo España). Durante el programa ODP (1985-2003), el *Joides Resolution* perforó 1.797 sondeos en 669 puntos, recuperando un total de 222 km de testigos.

La tercera fase, iniciada en octubre 2003, está todavía en marcha hoy en día: se llama **IODP** (*Integrated Ocean Drilling Programme*) y reúne 26

países. Está constituido por varias plataformas de sondeo: el buque americano *Joides Resolution*, reformado en 2008, un nuevo buque perforador japonés, el *Chikyu* (Crespo-Blanc et al., 2014), equipado de un *riser* (dispositivo que permite remontar los lodos de sondeo), y varias plataformas europeas para tareas específicas (zonas cubiertas de hielo, arrecifes de coral, etc.).

El programa internacional de sondeos oceánicos profundos es *la obra colectiva más importante jamás realizada en Ciencias de la Tierra* (Kornprobst y Laverne, 2011). Los primeros sondeos empezaron en el año 1968, y el programa no se ha interrumpido hasta hoy, 46 años después!

Balance de los sondeos profundos efectuados en la corteza oceánica

El programa de perforaciones profundas ha permitido perforar la corteza oceánica hasta casi 2 km. La Fig.19 da una tabla de los sondeos «corteza oceánica» exitosos, desde 1974. Como se ve en la figura, hay cuatro sondeos que perforaron más de 1200 metros dentro de la corteza oceánica (el sedimento no está representado): dos en el océano Pacífico de expansión rápida atravesaron la capa 2 basáltica, y dos en los océanos de expansión lenta atravesaron la capa 3 gabroica.

El récord de penetración en la corteza basáltica se alcanzó en el famoso sondeo 504B, con 1993 metros perforados, sin llegar a los gabros de la capa 3 (Fig. 20). Se pudo verificar que la corteza oceánica superior (la capa 2 de los geofísicos) está constituida por una capa de coladas basálticas (pillow lavas y lagos de lava) y una capa de diques de diabasas de grano fino, como en las ofiolitas. En el pozo IODP 1256D, no muy lejos de 504B, se pudo llegar hasta los gabros de la capa 3, gracias a la cuidadosa elección de un punto donde la corteza es más delgada (Laverne, 2008). Pero queda mucho camino, más o menos 4 kilómetros, para llegar al «Moho» (discontinuidad de Mohorovicic, transición entre la corteza y el manto de peridotitas).

Estos datos sobre la corteza oceánica del Pacífico se añadieron a los datos obtenidos en la misma zona utilizando los sumergibles *Nautilé* y *Alvin*. La exploración con sumergibles de la profunda fosa del *Hess Deep*, en la zona del punto triple de la dorsal de Galápagos con la dorsal del Pacífico (Fig. 21), permitió conseguir una amplia colección de muestras, y definir la estructura litológica de la corteza.

Así, la utilización de esas dos potentes herramientas en la zona de Galápagos permitió obtener un corte casi completo de la corteza oceánica, que sirve de modelo para las dorsales de expansión rápida (Fig. 22). El sumergible y el buque perforador se complementaron, el primero explorando los afloramientos de la superficie, a lo largo de vertiginosos acantilados submarinos, y el segundo sacando a la superficie centenares de testigos por debajo de la capa sedimentaria.

En la dorsal centro-Atlántica y en la dorsal SO Índica, de expansión lenta, la exposición en superficie de rocas profundas (gabros de la capa 3 y peridotitas del manto oceánico), gracias a grandes fallas de despegue, permitió perforar la capa 3 sin pasar por la capa 2, y atravesar el manto superior hasta más

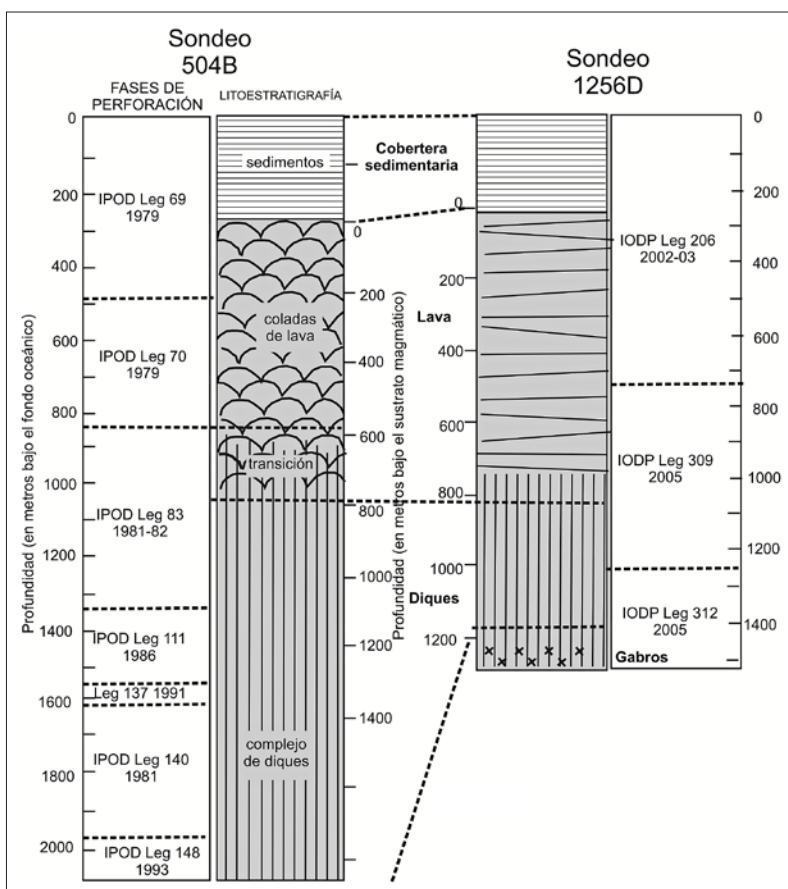


Fig. 20. Comparación de las columnas de los pozos 504B (izquierda) y 1256D (derecha). Izquierda: hicieron falta 7 «legs» de dos meses, o sea 14 meses de perforación, para llegar a la base del complejo de diques, sin llegar a tocar los gabros de la capa 3. Derecha: tres legs bastaron para llegar a los gabros de la capa 3 después de perforar 1.500 m de corteza basáltica (Juteau y Maury, 2012).

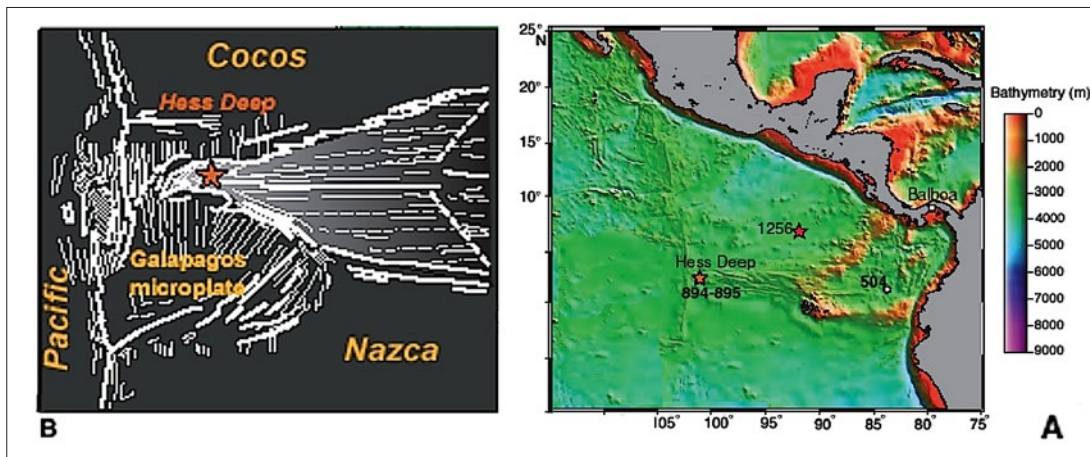


Fig. 21. Mapa de situación de los pozos 504B y 1256D, y de la fosa del Hess Deep (5.300 m), en el extremo del rift de Galápagos (dorsal Cocos-Nazca). La microplaca de Galápagos se sitúa en el punto triple entre la dorsal del Pacífico y la dorsal de Cocos-Nazca. Consultar la edición digital.

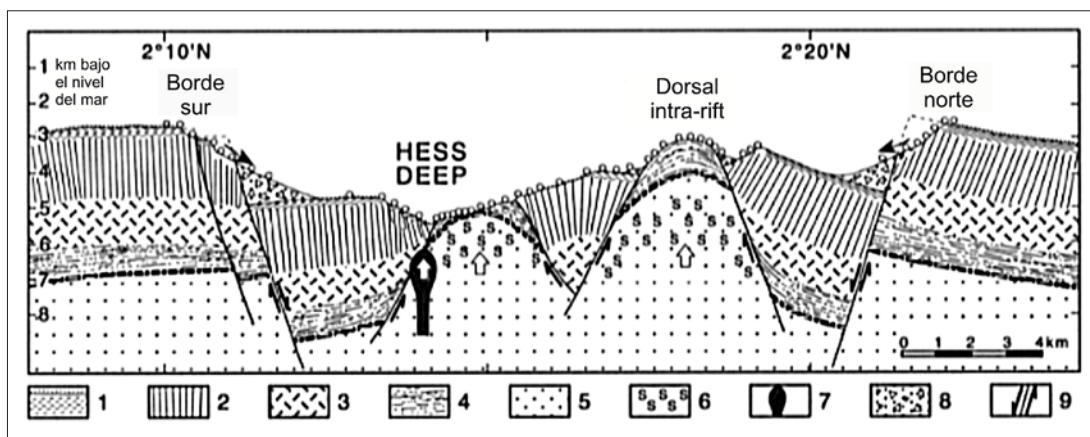


Fig. 22. Modelo para la corteza oceánica alrededor del Hess Deep (océano Pacífico), a partir de los datos obtenidos con el sumergible Nautile. 1. Coladas basálticas y su cobertera sedimentaria. 2. Complejo de diques (diabasas). 3. Gabros isotropos. 4. Gabros bandeados. 5. Peridotitas del manto superior. 6. Manto serpentizado. 7. Dique magmático (extremo oeste de la dorsal Cocos-Nazca). 8. Talud de despredimiento. 9. Falla normal. Según Fran-cheteau et al. (1990).

de 100 metros. Aquí también, las exploraciones por sumergibles permitieron añadir datos y muestras complementarios, y ayudaron a construir modelos de dorsales «lentas» (Ildfonse et al., 2007).

Un doloroso fracaso

En la primavera del año 2011, un equipo de científicos entusiastas volvieron al sondeo 1256D para profundizarlo. La expedición IODP 335 fue dramática: solo se pudo progresar 15 metros en dos meses! La inestabilidad del pozo, las temperaturas superiores a 100°C en el fondo del sondeo, el desgaste prematuro de los trépanos y del material de perforación, la difícil evacuación de los testigos, impidieron un avance significativo. Podrían enumerarse otros muchos fracasos, averías, incidentes técnicos de todas clases ocurridos durante campañas oceanográficas: trabajar en el mar implica hacer frente a multitud de dificultades cotidianas, ique pueden desanimar hasta los más valientes!

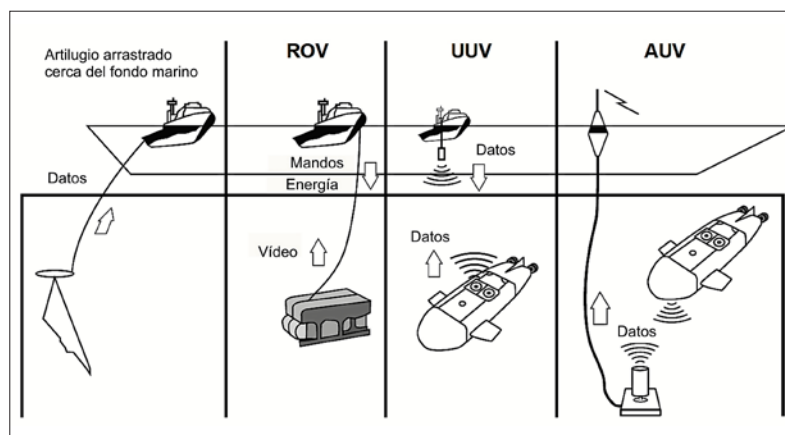
!Ya llegan los robots!

El principal inconveniente de los sumergibles habitados es que son... ¡habitados! La presencia de pasajeros impone numerosas obligaciones de seguridad, y las necesidades fisiológicas humanas limitan los buceos a una decena de horas como máximo, con 5-6 horas solo sobre el fondo oceánico. Para liberarse de esas obligaciones, los gran institutos oceanográficos desarrollan, desde hace varios

años, prototipos de vehículos no habitados más o menos robotizados, capaces de bucear a grandes profundidades, y de realizar todas las tareas de un sumergible habitado.

Hay dos clases de robots submarinos (Fig. 23): los **ROV** (*Remotely Operated Vehicles*), tele-operados desde un buque (Fig. 24), y los **AUV** (*Autonomous Underwater Vehicles*), libres de todo vínculo físico con un buque, y programados de antemano. Entre esas dos clases, hay que mencionar los **UUV** (*Untethered Underwater vehicles*), vehículos autónomos guiados por conexión acústica (ultrasonidos) desde la superficie. Los precursores de esos vehículos fueron los vehículos arrastrados sobre el fondo (*deep tow vehicles*), capaces de tomar fotos y videos, de medir temperaturas, de embarcar un sónar lateral para obtener imágenes acústicas del fondo, etc.

Fig. 23. Varios tipos de vehículos submarinos no habitados. En Juteau y Maury (2012), según un esquema de P. Van Rie.



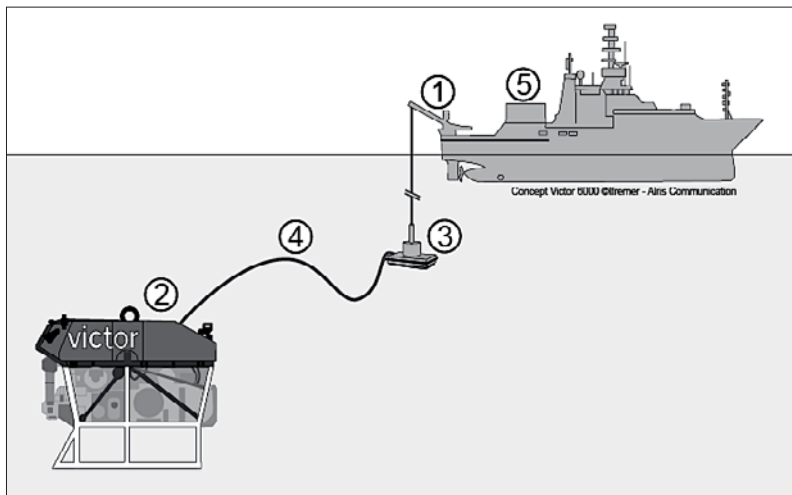


Fig. 24. El ROV VICTOR del instituto oceanográfico francés IFREMER. Puede bucear hasta 6.000 metros de profundidad. (Documento IFREMER).
 1. Torno de mano hidráulico (9.000 m de cable electro-portador).
 2. El vehículo VICTOR y su módulo científico (4,6 t).
 3. Lastre depresor (1,2 t).
 4. Cable (300 m).
 5. Puesto de mando.

Vehículos remolcados, ROV teleguidados, UUV y AUV autónomos: ¿Será esto el fin de los sumergibles habitados? A largo plazo es muy probable. Los robots submarinos se van a perfeccionar cada vez más, y sus ventajas sobre los sumergibles habitados serán tales que éstos se volverán obsoletos.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han descrito, sin pretender ser exhaustivo, 160 años de exploración de los fondos oceánicos:

- Del mapa de Matthew Maury (1855) al mapa del océano mundial de Marie Tharp y Bruce Heezen (1965), de la cuerda con lastre de plomo a la cartografía por sónares multihaz y por satélite.
- De la batiesfera de Beebe y Barton (1930) a los batiscafos y sumergibles «gran profundidad», ya sustituidos por robots cada vez más sofisticados... ¡y libres de seres humanos!
- De los dragados a los buques perforadores con alta tecnología que, año tras año, completan los archivos geológicos del océano mundial.

Como en el espacio, el conocimiento científico está estrechamente vinculado al progreso de la tecnología: cada progreso tecnológico, cada nueva herramienta proporciona una avalancha de datos de gran alcance.

¡El camino recorrido hasta hoy desde la mitad del siglo XIX es realmente impresionante! Pero *apenas hemos explorado el 2 o 3% de los fondos oceánicos*. Inmensas áreas oceánicas quedan sin explorar, e inmensos recursos económicos están escondidos en el océano profundo... ¿Llegaremos a perforar la corteza oceánica completa hasta el Moho? Y en los años venideros, ¿será posible ver de cerca una erupción volcánica a gran profundidad? Tanto la historia de las investigaciones oceánicas como los nuevos retos de la geología en este campo pueden resultar de interés para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra.

BIBLIOGRAFÍA

- Avérous, P. (1981). *Chercheur sur l'océan*. Hachette, Paris, 250 p.
- Ballard, R. D. (1987). *La découverte du Titanic*, p. 34. Glénat/Madison Press, 238 p.
- Crespo-Blanc, A., Hirose, T., Saffer, D., Tobin, H., Toczko, S, Maeda, L. y staff científico de la expedición 348 de IODP (2014). Sondeos oceánicos profundos: un sondeo de 5023 m bajo el nivel del mar en la zona de subducción de Nankai (Japón). *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 22.1, 86-89.
- Dick, H.J.B., Natland, J.H. y Ildefonse, B. (2006). *Past and future impact of Deep Drilling in the oceanic crust and mantle*. *Oceanography*, 19.4, 72-80.
- Francheteau, J., Armijo, R., Cheminée, J.L., Hékinian, R., Lonsdale, P. y Blum, N. (1990). *1 Ma East Pacific Rise oceanic crust and uppermost mantle exposed by rifting in Hess Deep (equatorial Pacific Ocean)*. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 101, 281-295.
- Ildefonse, B., Pona, P.A. y Blackman, D. (2007). *Drilling the crust at Mid-Ocean Ridges. An «In Depth» perspective*. *Oceanography*, 20, nº1.
- Juteau, T. (1993). *La naissance des océans*. Payot & Rivages, Paris, 382 p.
- Juteau, T. y Maury, R. (2012). *La croûte océanique. Pétrologie et dynamique endogènes*. Ed. Vuibert, Paris, 582 p.
- Kornprobst, J. y Laverne, C. (2011). *À la conquête des grands fonds océaniques*. Ed. Quae, Versailles, 175 p.
- Laubier, L. (1986). *Des oasis au fond des mers*. Ed. Le Rocher, Monaco, 155 p.
- Laubier, L. (1992). *Vingt mille vies sous la mer*. Ed. Odile Jacob, Paris, 332 p.
- Laverne, C. (2008). *Forages sous le Pacifique. Carnet de bord d'une géologue*. Ed. Atlantica, Biarritz, 115 p.
- Muller, R.D., Roest, W.R., Royer, J.-Y., Galahan, L.M. y Sclater, J.G. (1997). Digital isochrons of the world's ocean floor. *Journal of Geophysical Research*, 102, 3211-3214.
- Nataf, H.C. y Sommeria, J. (2000). *La physique et la Terre*. 144 p. Belin/CNRS éditions.
- Reyss, D. (1990). *Dans la nuit des abysses*. Ed. Découvertes Gallimard, Paris, 144 p.
- Riffaud, C. (1988). *La grande aventure des hommes sous la mer*. Ed. Albin Michel, Paris, 457 p.
- Riffaud, C. y Le Pichon X. (1976). *Expédition FAMOUS: à 3000 mètres sous l'Atlantique*. Albin Michel.
- Vanney, J.R. (1993). *Le mystère des abysses*. Fayard, Paris, 522 p.
- Vine, F.J. y Matthews, D.H. (1963). Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, 199, 947-949. ■

Este artículo fue recibido el día 2 de mayo y aceptado definitivamente para su publicación el 9 de junio de 2014.