

La oceanografía en los estudios de Ingeniería^(*)

Por JOSE JAVIER DIEZ GONZALEZ
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

No se puede considerar al hombre como un ser «nadador» ni, por tanto, acuático. Es sin duda un animal de la sabana a cuyo medio se adaptó de la forma que mejor le permitía salvar sus obstáculos más comunes. Pero siempre fue para él el medio acuático fuente de todo tipo de recursos, si bien al tiempo fue causa de toda suerte de riesgos. Su conquista y su «manejo» hubieron de constituir así, desde el principio, una necesidad insoslayable y actual a la par que teleológica, tal y como hoy se evidencia ya la del espacio.

Se pretende a continuación un esquema para la meditación sobre la convergencia de procesos hacia esa conquista hasta el momento presente.

La ocupación de las áreas costero-litorales y oceánicas

Ya inicialmente el hombre había estado enfrentado a las costas desde su lado «continental», y muy pronto logró desarrollar suficientemente las técnicas para hacerlo desde el oceánico o acuático. Las primeras civilizaciones «marineras», sin embargo, se desarrollaron sólo en las vertientes de mares interiores, donde la dinámica marina está suavizada respecto de la de los grandes océanos. Los pequeños barcos a remo y vela no estaban aún dotados para surcar estos últimos, por una parte, y, por la otra, el propio acceso a la costa y su protección en ella es mucho más fácil en aquellos primeros, con mucha menor agitación.

El Mediterráneo fue el principal de estos mares interiores promotores de civilizaciones marineras. Inicialmente en su parte oriental, donde los cretenses y los fenicios constituyeron dos formas de vida esencial y casi exclusivamente dependiente del mar; la pesca y el comercio marítimo constituyeron sus actividades fundamentales; los buques eran aún ligeros y de escaso calado y bastaban pequeñas ensenadas, puntas de playas o calas protegidas para permitirles el fondeo y el abrigo; y como punto de carga y descarga bastaban los numerosos puertos naturales de la cuenca. Otros pueblos orien-

tales, con costas al Golfo Pérsico y a otros mares marginales e interiores del Océano Indico, pudieron ser ignorantes competidores de aquéllos en el balbuceo de las técnicas de navegación.

Pero al margen de estos primeros amagos, parece evidente que se debe a los fenicios el despegue definitivo en la técnica de navegación en sí y en su utilización para el comercio, además de la originaria para la pesca; salieron del Mediterráneo por el otro extremo y alcanzaron sin duda Finisterre (véase el puerto de Bares) y, probablemente, las islas británicas por el norte y las islas Afortunadas (referencias en Plutarco, Plinio y Ptolomeo) por el sur; pero también navegaron con facilidad en el Golfo Pérsico; y todo ello en torno al año 1500 antes de Cristo. Salomón, hacia el año 900 parece haber recurrido a ellos en la expedición a Ophir (probablemente en el sudesde de Africa) y el rey Necho de Egipto los envió (año 600) al mar Rojo, desde el que algunos piensan que pudieron rodear Africa hasta volver por Gibraltar.

Ya ligada fundamentalmente al comercio, la navegación parece haberse desarrollado más en el Océano Indico y sus mares, en relación con el boyante intercambio con el Oriente (especies, joyas y sedas) que era absolutamente más importante que el occidental (minerales y conservas), centrado en Iberia y Casiterites, dado el entonces escaso interés del Continente africano. El aprovechamiento de los monzones esta-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de octubre de 1989.



Regimieto de nauegaciõ

Contiene las cosas que los pilotos han

de saber para bien nauegar: y los remedios y auisos que han de tener para los peligros que nauegando les pueden suceder.

Dirigido a la Real Magestad del Rey don
Philippe nuestro Señor.

Por el Maestro Pedro de medina vesino de Sevilla.

bleció una buena relación dialéctica entre su mayor conocimiento y las mejoras en las técnicas de navegación; además de ellos, sólo las estrellas permitían evitar el cabotaje, y hasta el siglo XIII no se tienen noticias del empleo de la brújula. El tapón musulmán obliga primero a rutas terrestres, costosas y peligrosas y, finalmente, a la búsqueda de otras navegables alternativas. El astrolabio parece haberse empezado a usar en las determinaciones angulares a mediados del siglo XV (Colón lo empleó en el Descubrimiento), aunque lo conocía ya Ptolomeo en el siglo II. La ruta del sur, portuguesa, se inició en 1420 bajo los auspicios de Enrique el Navegante y, tras unos lentos progresos iniciales, se culminó en 1498 por Vasco de Gama, después del avance definitivo de Bartolomé Díaz (1487-88) doblando Buena Esperanza y Agulhas. La ruta occidental, española, se le frustró a Colón en 1492 si bien a cambio del último continente; la de acceso a éste en el Atlántico Norte había sido posiblemente abier-

ta, quién sabe si detrás de algunos bacaladeros cantábricos, por navegantes normandos entre los siglos VIII y XI, aunque interrumpida e ignorada después en relación probablemente con dificultades climáticas. El complemento de dicha ruta occidental estuvo ligado a la exploración del continente americano y a la circunvolución de Elcano y Magallanes, pero con ello se modifica de nuevo el equilibrio del comercio internacional desplazándose hacia Occidente, y el valor estratégico de las diferentes rutas cambia sensiblemente.

Porque, en gran medida, el conocimiento de los mares y de las rutas de navegación ha constituido un factor esencial en el progreso humano; estrecha y dialécticamente relacionado con el desarrollo de la tecnología naval y el incremento en el tamaño de los barcos, por una parte, y con la capacidad para la construcción de puertos artificiales por otra. Son tres elementos que han marchado unidos en el devenir de la humanidad, junto con el que ha supuesto el motor de ésta: el incremento del intercambio comercial. Los cuatro constituyen cada uno de los apoyos de la plataforma que soporta la riqueza de nuestro mundo.

Los griegos primero y Roma después incorporaron nuevas técnicas de navegación e incrementaron el porte de las embarcaciones, lo que estuvo ligado al desarrollo de la construcción de diques para protección y atraque y a la apertura de mayores dársenas. quizás fue así Roma la que primero topó y resolvió las que, ya desde entonces, habían de ser limitaciones fundamentales de todo puerto: abrigo suficiente y superficie de agua bastante para el desarrollo de la actividad portuaria. La tercera limitación —superficie en tierra suficiente— no se manifestó todavía acuciante y sólo apareció con el desarrollo burgués y ciudadano alrededor de los grandes puertos medievales; la fortificación, primero, generalmente en forma de muralla artificial u orográfica, y la explosión demográfica y urbanística después, hubieron de plantear en ellos esta tercera limitación, hoy quizás preponderante para todos los puertos tradicionales.

Más tarde, la navegación fluvial, como medio de transporte entre Centroeuropa y el Mediterráneo, el comercio continental de mercancías orientales, favorecido por la navegabilidad

del Volga, Danubio y Rhin, el desarrollo de la burguesía en otras costas especialmente poco recortadas como las de los mares Báltico y del Norte y la preponderancia social paulatina de sus estructuras organizativas —Hansa, Flandes, etc— además de desplazar el centro de gravedad de la civilización, pusieron de manifiesto las ventajas de los puertos fluviales, con protección y superficie de agua más que suficiente. Aparecen puertos —Londres, Brujas, Rotterdam, Hamburgo, etc.— que ya compiten con los grandes tradicionales más en mar abierto: Pireo, Venecia, Génova, Marsella, Barcelona, etc. Incluso los nuevos puertos atlánticos motivados por los recientes descubrimientos geográficos —Lisboa, Sevilla, La Rochelle, El Havre— son interiores. Esta situación de transformación de las infraestructuras del comercio mundial es la que sufre una convulsión intensa con la serie de descubrimientos mencionados antes y que se concentran en gran medida en los últimos años del siglo XV y primeras décadas del XVI. Si bien la técnica portuaria, tras el «hallazgo» de los puertos interiores, deja a un lado en cierta medida su preocupación por las obras marítimas, las rutas comerciales sufren, probablemente, la mayor revolución de su historia, incluida la que se viene produciendo en las últimas décadas; y son las nuevas rutas las que «tiran» de la tecnología marítima y, a la postre, las que van a reclamar de nuevo las obras exteriores, incluso para fines portuarios, porque aun pensando que quizá es la interior la ubicación óptima de un puerto, tal ubicación es imposible cuando la costa no dispone de desembocaduras de suficiente envergadura.

La elección de la ubicación y estructuración de un puerto o conjunto de servicios y obras portuarias está hoy presidida por otros tipos de criterios, funcionales, estratégicos y geográficos y por la evolución y especialización del comercio marítimo. La transformación de viejos puertos otrora interiores, como el de Bilbao, es una consecuencia de este cambio de criterios. El desarrollo tecnológico, el incremento excepcional del nivel económico en los países llamados desarrollados y el de su nivel de demanda consecuente, la dependencia económica —en bienes reales y financieros y en servicios de trabajo— de éstos entre sí y respecto de las

materias primas poseídas con mayor abundancia relativa por los menos desarrollados, algunos conflictos internacionales que han condicionado y condicionan la utilización de las diversas rutas de navegación, y las largas distancias de transporte que todas las circunstancias anteriores han generalizado, han motivado dos tipos de movimientos evolutivos que han modificado, y lo siguen haciendo, muy rápidamente el tráfico marítimo y, como consecuencia, las condiciones de servicio portuario. De todos es conocida la especialización que se ha dado en los buques en función de la naturaleza de su carga. Los petroleros han crecido de forma tremenda hasta el punto de haberse discutido la oportunidad de la continuidad en su crecimiento y la rentabilidad de los mismos, habiéndose estimado por algunos (Brunn) que se estabilizarían en las 500.000 Tm de peso muerto; lo cierto es que, quizás a consecuencia de la crisis energética, tal estabilización se ha producido incluso por debajo de este tamaño. Sin llegar a tales extremos los mineraleros parecen alcanzar su óptimo en las 150.000 Tm de peso muerto, etc. Y cuando la naturaleza de la carga no ha provocado este gigantismo deformado de la especialización, es ésta misma, condicionada por otros factores como la mecanización de la manipulación, la necesidad de acortar estancias en puerto de los buques, la rapidez de la vida moderna y las exigencias de sincronizar y coordinar los distintos medios de transporte complementarios, es la propia especialización, repito, la que ha motivado, si no el aumento de la capacidad absoluta de los buques, sí su deformación para aumentar su capacidad relativa, como ha ocurrido con la mercancía general hasta provocar el desarrollo de los buques para contenedores, que, sin embargo, parece que tienen un tamaño óptimo próximo a las 30.000 Tm de peso muerto. Los pesqueros, por otra parte, necesitan agilidad antes que capacidad, desdoblándose entonces en los propiamente pesqueros y los buques factoría mayores. Y, finalmente, se ha desarrollado extraordinariamente, en variedad y cantidad, la industria de barcos deportivos. En resumen, con la especialización aparece la diversidad de tamaños, calados y capacidades de maniobra de los buques, y con ella, la especialización de sus atraques, cana-

les de navegación protegida y de los propios puertos como conjunto.

Pero volviendo al condicionamiento geográfico. Porque no existen grandes vías fluviales aprovechables, porque el conjunto de nuestras costas es especialmente recortado (lo que obliga a «fabricarse» las necesarias obras de abrigo), y porque estas costas abiertas son especialmente privilegiadas en el concierto mundial como lugares de asentamiento de población en busca de descanso y recreo, no pueden olvidarse las necesidades portuarias en una adecuada ordenación de las costas.

Porque el puerto se incorpora a la Historia Económica como un trascendental factor del desarrollo, ya que es evidente a este respecto la importancia decisiva supuesta por la institucionalización de las operaciones de cambio y transacciones. La principal limitación física (geográfica) para éstas pudo ser obviada gracias al desarrollo de los puertos. La necesidad de abrigo y seguridad no solamente frente a los agentes naturales, sino también frente al agresor — casi siempre contrincante económico en sentido amplio —, indujeron la tendencia a la concentración de servicios en los puertos. Con el desarrollo económico y político de los pueblos, y la especialización del transporte marítimo ya esbozada, esta concentración no sólo deja de ser tan necesaria sino que puede llegar a ser asfixiante y limitadora del desarrollo; necesita ya no sólo extenderse sobre una gran superficie — terrestre y acuifera — sino que, en los «puertos» de nueva creación, existe la tendencia a desarrollar verdaderas zonas portuarias a lo largo de un tramo litoral con obras más o menos específicas en relación con su utilización previsible por el, también, específico sistema de transporte respectivo. Puede pasarse así del concepto de puerto como recinto al de puerto como tramo litoral adecuadamente condicionado. Y ello hace que se entre aún más en colisión con el medio natural, en un cierto modo, y con otros aprovechamientos alternativos de dichos tramos litorales, en el otro.

Por otra parte, y también en el momento actual, la actividad económica en el sector primario, con la acuicultura, está por fin tratando de llegar a una explotación racional de los recursos alimentarios del medio marino. La Huma-

nidad ha rebasado ya el punto en el que se ha producido un acuerdo básico entre todas las partes, acerca de la inviabilidad a futuro de la metodología tradicional de capturas de pesca y de la necesidad de una cierta actividad o estrategia de cultivo, aun cuando este acuerdo no se logre plasmar en unos adecuados reglamentos de acatamiento general.

En el sector secundario las iniciativas extractivas están movilizándose cada vez más por los recursos de los fondos oceánicos, sin ceder en actividades ya tradicionales como las de obtención de hidrocarburos y, en menor grado, de materiales granulares litorales para la construcción y agricultura. Las perspectivas son tan importantes que de aquí nace la principal dificultad para que la Conferencia Internacional de Mar llegue a un mínimo acuerdo que pueda considerarse satisfactorio, aunque el hecho de que se mantenga por el momento permita abrigar esperanzas para el futuro.

Es imprescindible alcanzar la tecnología que permita la investigación y extracción de estos recursos, tanto en la plataforma costera como en los fondos estrictamente oceánicos, pero ello de manera que quede perfectamente preservado el medio. En este último sentido ha de progresarse mucho en el estudio y desarrollo de las soluciones para los problemas ambientales que plantean las actuales actividades industrial y urbana. El atajo del proceso de contaminación marina, singularmente en su franja costero-litoral, no puede esperar más. Y es otra vez en relación con esto con lo que el sector terciario puede introducir factores limitativos al desarrollo, porque tanto el subsector transporte como el de todos aquellos servicios destinados a cubrir las necesidades del ocio producen impactos ambientales considerables en los medios antes citados.

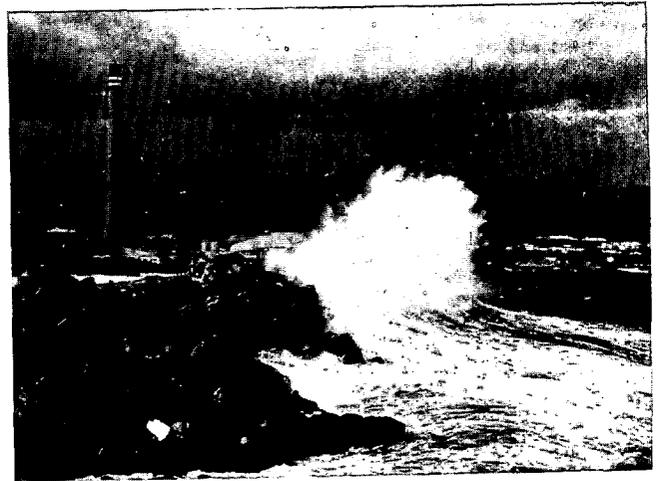
Tenemos que estar en condiciones de mejorar y desarrollar el transporte marítimo y los servicios náutico-costeros, a la vez que incrementar los elementos que permitan corregir los impactos negativos que se pudieren derivar o que ya se han derivado.

La aproximación al problema nos sitúa frente a dos perspectivas metodológicas y fenomenológicas del medio ambiente que no son, sin

embargo, más que dos consideraciones sucesivas del mismo. En la primera, que metodológicamente prescinde de los juicios de valor, se contempla el Medio en todas sus propiedades físicas, geomorfológicas y biológicas —incluso socioeconómicas— como marco de desarrollo, en estabilidad dinámica y evolutiva, de un macroecosistema, del que forman parte cada uno de los ecosistemas parciales. En la segunda consideración se introducen juicios de valor para la definición de las perturbaciones —contaminaciones en sentido amplio— que modifican nocivamente al medio, estudiando así las características y consecuencias de tales perturbaciones. Y más que perspectivas alternativas son consideraciones sucesivas del mismo hecho —el medio ambiente—, porque su «perturbación» no es más que una circunstancia, un factor más en la evolución del macroecosistema general. Lo que ocurre es que el desarrollo de la especie humana, con la explosión industrial, demográfica y de consumo, ha multiplicado y acelerado en tal grado el ritmo de todo tipo de perturbaciones que se teme no estar preparado en agilidad y medios para dirigir la evolución adecuadamente.

Las perturbaciones del medio marino, sobre todo en las proximidades a la costa, y de la propia franja costera, debidas no solamente a elementos polucionantes sino a la propia presencia y tráfico humanos en densidades anormales y al acondicionamiento exigido para ellos —tráfico marítimo y puertos, zonas de recreo, creación y conservación de las mismas, etc.— se han de corresponder, por tanto, con las actuaciones que se relacionan con la concreta ordenación de los territorios que configuran sus áreas de influencia respectivas, tanto como con la utilización que se haga del propio medio marino.

Las operaciones de dragado tienen una muy singular historia, al margen del problema que se derivó de la dificultad para contar con los cables adecuados. El dragado, como operación de extracción de materiales para mantener calados es conocido ya en Sumeria y Egipto 4.000 años antes de Cristo; se tiene noticia de un primer canal entre el Nilo y el mar Rojo en torno al 600 antes de Cristo, realizado por medios manuales. En el río Indo se sabe de una técnica



de agitación por arrastre para poner en suspensión los materiales que la propia corriente se encarga de desplazar y que se practicaba varios siglos antes de nuestra era; esta técnica, más o menos sofisticada, se utilizaba todavía en Holanda, Middleburg, en 1435. Los principios de la mecánica renacentista y los de la termodinámica en el siglo XVIII fueron rápidamente aplicados al dragado con arrastre, asistiéndose hoy a una verdadera revolución en esta tecnología. Pero la obtención de muestras exigía, además, de una buena técnica de inalterabilidad; la expedición de Challenger conjuntó todos los avances para dejar resuelto el problema de las muestras por sondeo, aunque fue ésta una una de sus mayores dificultades. En el momento actual estas operaciones constituyen parte fundamental de la ingeniería marítima, por su número y por el volumen de inversiones. Y por sus características y los requerimientos de vertido, son fuentes de frecuentes e importantes impactos ambientales.

En este marco, merece una breve reflexión la evolución del conocimiento de los océanos, como elemento que se ha reconocido relacionado dialécticamente con los otros tres mencionados más arriba y como el fundamental para el tema que aquí nos ocupa. No se va a discutir, sin embargo, ningún aspecto de los dos elementos restantes —tecnología naval y comercio internacional— por estimarlos claramente fuera de nuestro objeto.

La conquista gnoseológica

El conocimiento del medio marino tiene una historia que está ligada a la de la humanidad como tal. El mundo mediterráneo, el mar Rojo, el Golfo Pérsico, los mares marginales del Océano Indico, y los del Pacífico occidental, el Atlántico, el Pacífico, la ruta de la Circunvalación, el Antártico y al Artico son los sucesivos elementos del conjunto oceánico que van siendo descubiertos y reconocidos por navegantes y estudiosos. En el siglo XVI (1519-1522) se puede decir que se termina la primera aproximación, con la circunnavegación de Magallanes-Elcano, y que con ella se completa por vez primera la visión de nuestro planeta tal como hoy lo concebimos; porque el reconocimiento de los mares nos ha puesto en el verdadero camino para la auténtica identificación de los continentes. A lo largo de los siglos XVI y XVII, se completa al detalle esa primera aproximación, merced a la lucha por el dominio militar del mar por parte de las potencias europeas. Pero, salvo muy excepcionales casos, los datos sobre la profundidad, la naturaleza de los fondos y las características bajo la superficie son nulos (a este respecto son de destacar las anotaciones submarinas y sobre los fondos de las expediciones de Colón y Magallanes). Y sobre la propia forma y dimensiones de los mares, los datos dejaban mucho que desear (también a este respecto es de destacar el Atlas Universal de Joao Martínez (1587) del que se ha realizado una magnífica edición en 1975.

Así, hasta la «Geographia Generalis» de Varenius no podemos hablar de un tratado en el que se contiee alguna información precisa sobre el mundo marino, en tres capítulos de oceanografía y seis más de cartas marítimas, con datos sobre vientos, corrientes, etc.

En 1663 Vossius publica un tratado sobre los movimientos del mar y del aire, mostrando además las concomitancias entre ambos medios; y en 1678 Kircher elabora el primer mapa global de corrientes oceánicas. Halley, en 1715, inicia los estudios fisicoquímicos con un tratado sobre la salinidad de los océanos y de los mares interiores, si bien ya había publicado un mapa de los vientos oceánicos en 1688 y la primera carta isogónica en 1695. Y en torno al

1700 Dampier publica su completísimo «A discourse of the Winds», que los tratadistas consideran un extraordinario precedente de los trabajos definitivos de Maury.

Conviene recordar aquí los hitos del progreso de las ciencias físicas en los siglos XVI y XVII en que, de manera definitiva, pudo alcanzarse la libertad de investigación y la independencia respecto de las ataduras socioteológicas que la habían entorpecido en gran medida y, para ello, mencionar a Bruno, a Galileo, a Newton y a Leibnitz, verdaderos motores primeros de todo el extraordinario desarrollo de los dos siglos posteriores. Y también, que entonces se configuran la Química y la Biología como prociencias independientes, aunque ligadas a la Física.

Es indudable, por tanto, la importancia decisiva de estos dos siglos en el desarrollo posterior de la ciencia experimental en todas sus ramas. Y en este ambiente de curiosidad explosiva y generalizada no es de extrañar la aportación oceanográfica notable de figuras de la física como Kepler y Newton, que estudiaron las mareas, o como más tarde, Franklin que, en 1770, llega a publicar un mapa detallado de la corriente del golfo con estudios termométricos precisos de la misma.

Pero lo más trascendente a lo largo del siglo XVIII es esa tendencia analítico-sistólica que conduce a una división dicotómica del campo del conocimiento, pero que permite aumentar rápidamente, con la especialización, el volumen de datos de observación y experimentales. Conviene también recordar que el tiempo de racionalismo filosófico en este siglo se relaciona con el desarrollo de la Mecánica; por extensión de la teoría gravitatoria se desarrolla la electricidad y el magnetismo, y la teoría general de campos y el concepto de potencial; también se introduce la teoría de probabilidades, con lo que se abre la puerta para los modelos que se generalizarán dos siglos después.

Y tras el largo período de sucesivas escisiones dicotómicas a partir del tronco científico, en las que se generaban las diferentes ciencias singulares, se observa en el siglo XIX una creciente tendencia a la convergencia de todas ellas de nuevo.

Pues bien, gracias a este proceso, V. Humboldt pudo por fin iniciar las observaciones bajo la superficie con carácter general tomando las temperaturas y determinando la corriente en el Perú hasta reconocer con precisión los afloramientos (up-wellings) y la circulación y procedencia de las corrientes de aguas frías sumergidas. En su tratado («Kosmos», 1845) se muestran ya los elementos esenciales del medio oceánico, aunque no se desvelan ni el espesor de la atmósfera ni la profundidad de los mares, a causa de la falta de capacidad tecnológica suficiente para medirlos. Fue la necesidad de establecer comunicaciones telegráficas la que llevó al desarrollo de los métodos y técnicas adecuadas para realizar los sondeos.

Hay quien establece el origen de la oceanografía como ciencia independiente e interdisciplinada en 1850 con los trabajos de Maury y quien prefiere establecerlo en 1872 con la expedición del Challenger. Aquél publicó en 1849 el primer atlas náutico y la primera carta batimétrica del Atlántico norte, lo que, junto con su «The Physical Geography of the sea» (1855), puede configurar el primer tratado de Oceanografía conocido. También ideó el uso de ondas sonoras para los sondeos, aunque sólo se pusieron a punto cincuenta años más tarde. En 1853 fue el alma de la conferencia internacional de Bruselas que estableció las condiciones de observación del «clima marítimo» por los barcos de tráfico normal, y que fueron completados en el Congreso de Londres en 1873.

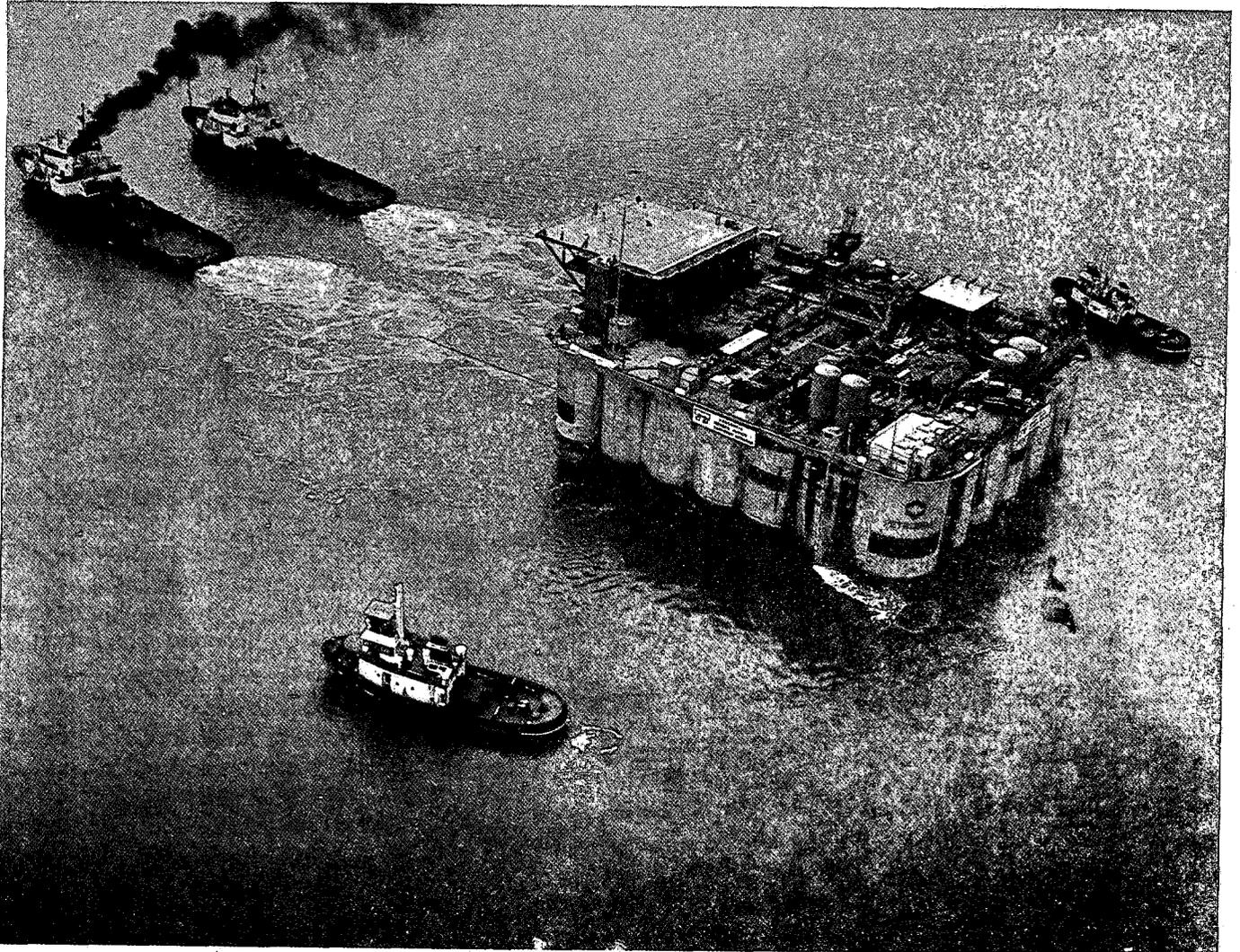
En el posterior progreso de los conocimientos sobre el medio oceánico tuvieron importancia decisiva tres conjuntos de fenómenos.

El primero de ellos es el que demandaba un conocimiento preciso de la topografía de los fondos marinos. Exigía una adecuada tecnología para la determinación de profundidades y el posicionamiento de los barcos de sondeo; y el principal hecho práctico e ingenieril que consiguió la suficiente movilización de recursos para conseguirlo fue el tendido de los cables telegráficos submarinos, a partir de 1851, en que se comunicaron Dover y Calais. La rapidez de las comunicaciones y las ventajas de la información imponían una vez más su ley en el desarrollo de la Humanidad.

El segundo se derivó de la necesidad de un óptimo conocimiento de aquellas rutas marítimas que permitieron reducir al máximo las travesías; ello se tradujo en la exigencia de conocer con precisión los vientos, corrientes y otros elementos que pudieran afectar a las rutas. La aparición de las máquinas térmicas aminoraron pero no eliminaron esta dependencia, por cuanto la rapidez de los transportes siempre constituirá un hecho económico de primera magnitud; en torno a 1850 el comercio del té y otros productos perecederos análogos fueron el motivo oportuno para incentivar un proceso que culminó con el primer atlas náutico de Maury, primera de una serie interminable de aportaciones en el mejor conocimiento de las rutas de navegación en relación con las condiciones meteorológicas y oceanográficas.

El tercer conjunto de fenómenos tiene un carácter más estrictamente científico, sin embargo. Aunque Ross había descubierto ciertas manifestaciones de vida en sus dragados en la bahía Baffin a profundidades «determinadas» de hasta 1.800 m aproximadamente, la teoría «abisal» de Forbes, aparentemente confirmada en sus campañas de dragado en el Egeo y otros mares, y que enunciaba la reducción progresiva de vida con la profundidad hasta desaparecer a partir de los 550 metros, las había dejado en entredicho. Observaciones casuales, como las derivadas de la recogida de algunos cables submarinos para su reparación, replantearon el problema, que fue resuelto contra Forbes por Thompson, pero, y de ahí su importancia, no sin antes movilizar una excepcional aplicación de recursos a los estudios oceanográficos.

La distinción entre móviles científicos y tecnológicos debe entenderse, sin embargo, en un sentido relativo, por cuanto será difícil precisar la frontera. En la práctica de cada día, en el momento actual al menos, tal distinción es imposible, ya que la ciencia se aplica hoy, como la tecnología, a la resolución de problemas prácticos como, en nuestro caso, la generación de nuevos recursos alimentarios y físicos, o la eliminación y control de la polución sin riesgo para la conservación de la naturaleza. Y también será difícil ignorar algunos objetivos de este tipo en la expedición del Challenger y en los que le precedieron y sucedieron. Lo importante es



darse cuenta del valor que para la observación de los océanos han supuesto los estudios de Biología, Geología, etc., y recíprocamente, de la aportación que aquélla hizo a la propia génesis de estas últimas ciencias. La expedición del Beagle, iniciada en los últimos días de 1831, con sus observaciones oceánicas e insulares, ha sido fundamental en la teoría de Darwin, con lo que podemos decir que se configura la Biología como ciencia. Y lo mismo ocurrirá en la primera mitad de nuestro siglo con respecto a la Geotectónica.

La creencia de que el mundo había sido creado en el año 4004 antes de Cristo, que se había generalizado en el siglo XVII, se había debilitado a causa de los estudios de las rocas y de la sucesión de formas de vida a lo largo del

XVIII, pero aún no había aparecido el concepto de un planeta verdaderamente antiguo y en evolución: La hipótesis de la continuidad evolutiva de Lammark, e incluso la de las extinciones catastróficas de Couvier, admiten esa antigüedad y los cambios a lo largo de ella, y flota en ciertos ambientes una interpretación más moderna; pero hace falta la genialidad de Darwin y su ingente experiencia en el Beagle para concretarla con la generalidad y profundidad que él lo hizo.

Tras el Beagle se desarrollaron los estudios de Forbes y se prodigaron los cruceros de dragado, al principio limitados a las trescientas brazas por razones técnicas derivadas de la dificultad de manipular cables más largos. Tales expediciones culminaron con la del Challenger

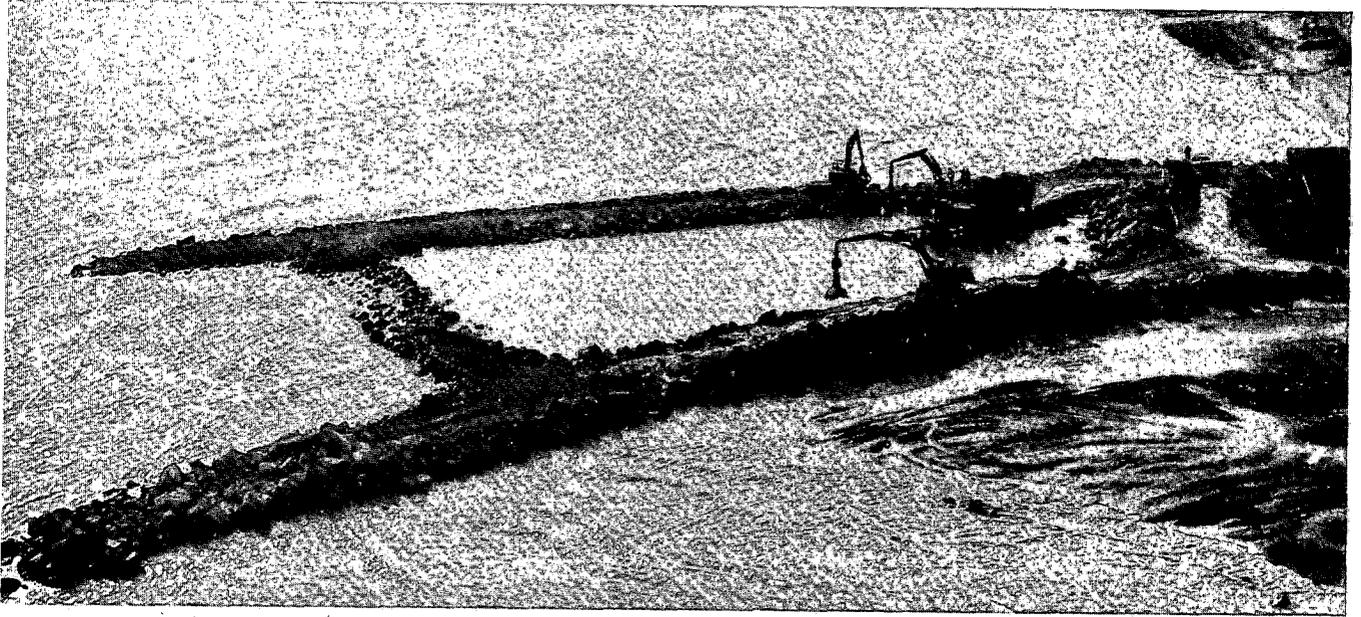
(1872-1876) dirigida por Thompson, que sirvió para limitar las teorías de Forbes, y la del *Gazelle* (1874), dirigida por Scheleinitz.

A Thompson se le considera el padre de la Oceanografía moderna y cuando se dirigió la expedición del *Challenger* ya había realizado progresos importantes en los sondeos con dragado en el Atlántico norte. Propuso el estudio de los sedimentos modernos (no de los procesos sedimentarios actuales, que no se puede inducir la analogía) como medio para conocer los antiguos. La expedición del *Challenger* culminó con la publicación de cincuenta volúmenes de datos que configuraron una completa Oceanografía descriptiva (Murray, 1882) con referencias concretas a la Meteorología, a la Hidrografía, a la Física y a la Química, a la Geología, a la Petrología, a la Botánica y a la Zoología y a la Geografía marinas. Sirvieron de base después a una verdadera Oceanografía analítica que se manifestó en una impresionante explosión bibliográfica en los últimos años del siglo; la expedición sondeó las profundidades de todos los océanos, excepto el Artico, y comenzó a determinar sistemáticamente los diferentes parámetros —temperatura, corrientes, salinidad— a las distintas profundidades, a la vez que se exploraba la atmósfera en el punto y se obtenían muestras de dragado. Una de las consecuencias fue la ley de la constancia de los elementos (Dittman), que se mantiene hoy vigente después de innumerables contrastes y verificaciones.

Iniciada la Oceanografía como ciencia se pueden distinguir tres etapas en su desarrollo. La primera entronca con las publicaciones de finales del siglo pasado, y se realiza en ella la exploración tridimensional de los mares basándose en un cierto supuesto de estacionariedad. La física, química, biología y geología la desarrollan y fundamentan dialécticamente y se establecen numerosos puntos de muestreo, más o menos espaciados, lo que conduce a un tratamiento aleatorio de los datos de observación. Se sitúan estaciones fijas a profundidades crecientes. Es la etapa de las grandes campañas de planteamiento general y de las campañas locales muy detalladas, casi todas desarrolladas en ambas costas del Atlántico Norte. También se intensifica la exploración de los océanos Ar-

tico (desde 1893) y Antártico (desde 1897). Knudsen sienta las bases para distinguir entre clorinidad y salinidad. Finalmente, se produce el paso de la oceanografía descriptivo-geográfica a la físico-matemática, ya en claro proceso de síntesis: la fase diastólica se inicia. Witte en 1878, por otra parte, no sólo había publicado un mapa de corrientes con afloramientos sino que, por primera vez, abordó la relación teórica entre un campo de masas en un océano baroclínico y la estructura vertical de las corrientes, y llegó a la fórmula para la pendiente de la capa límite entre dos masas de agua (1879) que sólo 30 años más tarde mereció la atención de los investigadores con la fórmula de Margules (1906).

La segunda etapa, entre las dos guerras, incorpora al análisis una cuarta variable obviada hasta el momento: el tiempo. Los datos obtenidos y su análisis, en su tratamiento sintético, mostraron la imposibilidad de admitir la estacionariedad de los procesos, al menos más allá de un cierto límite, y ello llevó a un nuevo análisis tetradimensional. Por otra parte en Europa se produjo un renacimiento del idealismo que revitalizó los planteamientos científicos «puros», «desinteresados», lo que favorece el tratamiento con la puesta en funcionamiento de barcos oceanográficos. Sin embargo, fue sin duda la finalista investigación americana la que permitió avanzar más en esa línea. Estados Unidos había decidido la absoluta necesidad de mejorar la tecnología marítima; las prospecciones y explotaciones petrolíferas en la plataforma continental, la mejora en la navegación, la predicción de tornados, huracanes, etc., indujeron a la creación de instituciones como la Woods Hole Oceanography, cuya promoción de la investigación garantizaba plenamente los estudios y sus aplicaciones. En consecuencia, en esta segunda etapa se profundizó en la comprensión de la estructura y de la dinámica de los océanos, debido en parte a una mejor modelización teórica y en parte a la mejora de las técnicas, métodos y planificación de la observación; la interdisciplinariedad de los estudios y tecnología oceanográfica era ya irreversible. En esta etapa sale a la palestra una verdadera revolución en la comprensión a gran escala de la geología con la hipótesis de la Deriva Continental,



cuyas bases habían aparecido entre 1910 y 1912, pero que ahora Wegener completó en su «Origen de los Continentes y Océanos», del que entre 1915 y 1929 se hicieron cuatro ediciones.

La tercera etapa, que podemos considerar desarrollándose desde 1950 aproximadamente, es la de la sofisticación de los modelos, tanto de los teóricos, con la ayuda de los ordenadores, como de los físicos, a escala reducida y natural. El cálculo de probabilidades había llegado a su madurez y el análisis estocástico entró inmediatamente en el estudio de la dinámica oceánica y singularmente, del oleaje (Philips, Miles, Longuet-Higgins, etc.). Los progresos en este campo desde entonces son rápidamente crecientes. Ello ha permitido introducir, incluso con la ayuda del cálculo electrónico, el análisis multivariado en el diseño de obras y estructuras marítimas (S. Bores, 1977). En otro orden de cosas, la hipótesis de la deriva de los continentes adquiere nuevos matices con el desarrollo, durante los años cincuenta y sesenta, de la Tectónica de Placas. Las interrelaciones entre la geología y la geofísica se hicieron rápidamente evidentes y dos aportaciones en 1956 produjeron una verdadera conmoción científica: la hipótesis sobre la diversidad de las direcciones de magnetización y su evolución, y el descubrimiento de las cordilleras centrooceánicas. En 1960, Hess propone una nueva visión de la Deriva, que en estos momentos está mostran-

do una enorme potencia como modelo teórico. La utilización científica del mismo está permitiendo una verdadera revolución analítica que, en medida principal, afecta a las ciencias e ingeniería marítimas. El problema, sin embargo, se está produciendo ahora a causa del escaso desarrollo de la técnica legal en estos temas; se nota la ausencia de una estructura legal internacional y marítima que facilite la cooperación en las nuevas investigaciones y explotaciones.

Consideraciones finales

Para terminar estas consideraciones es preciso aún dejar clarificados algunos hechos y relaciones.

En primer lugar, dada la general y relativa accesibilidad del hombre a cualquier punto de las plataformas continentales, hay que considerar hoy las actuaciones en las costas en relación, no sólo con la ordenación territorial, sino también con el conjunto de actividades en el océano.

En segundo lugar, se ha de reconocer que el ciclo alimentario en el mar relaciona toda la vida marina y, junto con ella, toda la dinámica oceánica; esto supone el no poder abordar seriamente ninguna actividad explotadora en el campo alimentario que no tenga en cuenta las condiciones físico-químicas y dinámicas del me-

dio. Pero, a su vez, las características físico-químicas del agua marina se reconoce hoy que están en estrecha relación con el propio origen de los océanos, por una parte, y con las características de los fenómenos climatológicos, por otra. Los tiempos en que se creía que el origen de las sales del océano estaba en la erosión de los continentes durante el ciclo del agua en los mismos, han pasado, a la luz de las nuevas aportaciones científicas son los mismos fenómenos que generan el fondo marino los que producen la aportación iónica, al menos en forma absolutamente preponderante; y son las condiciones y forma en que se produce la radiación solar y la influencia atmosférica en ella y en los movimientos de la superficie del mar quienes condicionan la generación de algunas corrientes, de la lluvia, de las variaciones de la salinidad y temperatura y, en última instancia, de los afloramientos (upwellings) y de la producción pesquera.

En tercer lugar, hay hoy elementos de juicio suficientes para aceptar que el gran motor de la dinámica oceánica se encuentra en la atmósfera, a través de la interacción aire-agua en su interfase, si bien con la aportación decisiva de la propia masa de agua oceánica funcionando como motor térmico. Así, el balance calórico del océano y la acción del viento son los fundamentales y, casi se puede aceptar que exclusivos, factores para explicar los movimientos del mar, a excepción de los que tienen su origen en la gravitación universal y que configuran la marea astronómica. Pero, además, se puede aislar aún al viento como factor primordial en la generación de los dos tipos de movimiento

que tienen mayor relevancia para la tecnología marina: el oleaje y las corrientes.

En cuarto lugar, que la interacción entre la masa oceánica de agua y la corteza terrestre no se queda en la acción morfogenética sobre las costas, sino en una compleja serie de fenómenos, que van desde las corrientes de turbidez hasta los tsunamis, todos los cuales se concatenan con los repasados antes; la tectónica oceánica se traduce en frecuentes maremotos que en algunos casos han de ser tenidos en cuenta en las actuaciones humanas por su posible tremendo impacto; y los fenómenos de turbidez tienen una importancia decisiva en la biocenosis marina, y son, por tanto, parámetro de primer orden de su biotopo.

Finalmente, tener en cuenta que el mar tiene unas condiciones óptimas de explotabilidad como cualquier otro medio sobre la tierra; que es escaso, aun cuando no se tenga conciencia de ello; que tanto impacto se puede derivar de la utilización recreativa y turística del litoral, por ejemplo, como de las prospecciones en la plataforma y de la navegación, en el otro extremo; y que los conflictos que se pueden plantear entre las distintas actividades deben resolverse en unas adecuadas ordenación e inversión. Para ello, los profesionales que participen en esas actividades deben ser «primero pensadores y después técnicos» (Tuzzo Wilson). Si bien es evidente, hay una cierta dificultad derivada de los conflictos entre los países y de la ausencia de un eficiente sistema jurídico internacional que resulta ser insuficiente, tanto en sí mismo como en su ascendencia real sobre los países individuales y sobre sus asociaciones.

