

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

DISCURSO INAUGURAL

DEL AÑO ACADÉMICO 1977-1978

LEIDO EN LA SESIÓN CELEBRADA EL DÍA DE 2 NOVIEMBRE DE 1977

POR EL ACADÉMICO NUMERARIO

EXCMO. SR. D. ANTONIO ALMELA SAMPER



M A D R I D
DOMICILIO DE LA ACADEMIA
VALVERDE, 22.—TELÉFONO 221-25-29
1 9 7 7

Depósito Legal M. 85.084.—1977

TALLERES GRÁFICOS VDA. DE C. BERMEJO. — J. GARCÍA MORATO, 122. — TEL. 233 06 19. — MADRID

PROSPECCION MINERA SUBMARINA

La investigación y explotación de los depósitos minerales que se sabe existen en el fondo de los mares y océanos, es una cuestión totalmente nueva que hoy se plantea a la Humanidad y que presenta serios problemas de tres órdenes. Problemas técnicos ; la extracción y beneficio de minerales que yacen bajo una capa de agua de 4.000 a 6.000 metros, obliga a una tecnología muy compleja, diferente de las técnicas mineras normales. Problemas económicos ; esta complejidad y las dificultades de todo orden que presenta una explotación de este tipo, hacen que se requiera una ingente inversión de capital para operaciones que, dada su novedad y dificultad, hay que considerar como muy aleatorias. Problemas políticos ; la circunstancia de situarse las posibles explotaciones en áreas que quedan fuera de la jurisdicción de todos los países, hace que todos ellos quieran beneficiarse de esta riqueza, y, por tanto, es forzoso que se confeccione una legislación internacional que garantice, tanto esto, como la protección de las empresas u organismos que vayan a realizar estas operaciones. De todos los problemas, estos últimos son los que más dificultades presentan y sobre los que se viene discutiendo desde hace años en las Naciones Unidas.

* * *

La Humanidad desde sus más remotos tiempos viene explotando los mares tomando de éstos lo que estaba más al alcance de su mano ; los seres vivos que contiene : mamíferos, peces, moluscos, etc. Pero se tenía un desconocimiento casi total de las características de los fondos oceánicos y de las posibilidades de explotación que estos encierran, que sólo han sido descubiertas ya en la segunda mitad del presente siglo, merced a los potentes medios de investigación que la vertiginosa evolución de la tecnología ha proporcionado.

En la expedición que durante los años 1873-76 realizó el barco *Challenger*, se encontraron, por primera vez, en los fondos marinos nódulos de manganeso y hierro, que durante mucho tiempo se tuvieron tan sólo como una curiosidad científica (Murray y Renard, Londres, 1891).

Pero el sorprendente y rápido avance de las técnicas de prospección submarinas, que de modo muy importante se debe al veloz incremento de consumo de petróleo en este siglo, y la consiguiente necesidad de encontrar nuevos yacimientos, ha permitido disponer de aparatos y equipos capaces de efectuar reconocimientos y sondeos, primero en fondos marinos de la plataforma continental, que luego se han extendido a zonas de mar profundo, fuera de aquélla, mediante dispositivos que permiten anclar electrónicamente una plataforma de sondeo sin anclaje mecánico y efectuar maniobras de extracción de testigos y sustitución de elementos, en taladros iniciados a varios miles de metros bajo el nivel del mar.

Este proceso de perfeccionamiento técnico y científico hizo posible que en abril de 1967 comenzara una serie de campañas de investigación de los fondos oceánicos con el barco *Glomar Challenger*, bajo la denominación de Deep Sea Drilling Project, financiado por la National Science Foundation, y realizado por la Scripps Institution of Oceanography.

En estas campañas se llevan realizados más de 500 sondeos en los diferentes mares y océanos, perforando, a veces, más de 200 metros del fondo marino, y extrayendo testigos de estos sondeos, que se han realizado bajo columnas de agua hasta de 5.000 metros.

No es necesario encarecer el grado de perfección técnica que se requiere para llevar a cabo, en condiciones tan duras, estas operaciones.

Los abundantes datos obtenidos en estas campañas, unidos a las muchas investigaciones efectuadas por diferentes buques oceanográficos, han permitido ir conociendo, cada vez mejor, la topografía submarina y las interesantes características que ofrecen las dorsales oceánicas, sus valles medios, las mesetas, fosas y demás accidentes de los fondos marinos. Todo ello ha proporcionado un conocimiento mucho más preciso de estas extensas áreas, y ha conducido a la formulación de nuevas teorías geológicas, tales como la tectónica de placas.

Por otra parte, los mares, que ocupan una superficie de unos 375 millones de kilómetros cuadrados, lo que representa casi las tres cuartas partes de la total superficie del globo, tienen una fuerte salinidad en la que intervienen como constituyentes mayores, cloro, sodio, magnesio, azufre, calcio, potasio, etc., y como constituyentes menores, hierro, manganeso, bario, litio, fósforo, cobre, silicio, yodo, etc., y se ha pensado que en determinadas circunstancias, fenómenos químicos o biológicos han podido precipitar en los fondos marinos algunos de estos elementos.

Desde tiempos remotos se ha especulado sobre la posibilidad de explotar algunas de las sustancias disueltas en el agua del mar, pero siempre se ha considerado esto como un ideal inalcanzable económicamente, y sólo ha quedado como factible la obtención del cloruro sódico, que desde tiempos antiguos se viene beneficiando en las salinas marítimas.

Los adelantos de la técnica y consiguiente mejor conocimiento del fondo de los mares ha inducido a buscar aquellos elementos que por su fácil extracción o por su mayor valor industrial pudieran ser explotables económicamente. En determinadas zonas de la plataforma continental, bajo aguas someras, existen minerales pesados, de origen detrítico, en especial casiterita, rutilo, ilmenita, zircón y otros, así como materiales de poco valor unitario, pero utilizables en grandes cantidades, especialmente en obras, como son las arenas y gravas para áridos. Estas sustancias del fondo marino de la plataforma continental pueden constituir un depósito potencialmente explotable cuando por la poca profundidad son fácilmente extraíbles por los métodos normales o se encuentran suficientemente cerca de la costa para ser explotados por pozo y galería desde tierra firme.

Dejando de lado los yacimientos, que por ser prolongación de los terrestres, son conocidas sus características y su posibilidad de explotación económica, los tipos de depósitos marinos, minerales pesados y gravas, serán susceptibles de explotación económica si se cumplen los requisitos siguientes: si se conoce o puede ser localizada con precisión la existencia y extensión de aquellos minerales, o si se conocen o vienen señaladas en cartas náuticas áreas de gravas; si el tonelaje del depósito es suficientemente grande; si pueden emplearse métodos mineros muy experimentados, con poca o ninguna modificación, tales como excavadoras, dragas,

dragalinas, etc. ; y si la prospección demuestra que las demás condiciones del yacimiento son favorables para una explotación rentable. Como los métodos tradicionales de exploración y explotación en áreas marítimas resultan muy costosos y más aún si se utilizan nuevas técnicas y equipos, cuando alguna de las anteriores condiciones resulte dudosa o inapropiada, las empresas, lógicamente, se han de resistir a lanzarse a aventuras de dudoso resultado.

Lo que hasta aquí se viene exponiendo se refiere a explotaciones posibles bajo aguas someras. Pero las modernas investigaciones han puesto de manifiesto la existencia de concentraciones metalíferas muy interesantes, fuera de la plataforma continental, en profundidades que exceden de los 4.000 metros. Estas concentraciones son principalmente de dos tipos : nódulos polimetálicos y sedimentos metalíferos. Hasta el presente, los nódulos aparecen en áreas más extensas y las investigaciones se han orientado, principalmente, hacia el estudio de los nódulos polimetálicos, que parece que presentan un interés mayor y una más extensa área de distribución, que los sedimentos metalíferos.

Las naciones más desarrolladas, y en especial Estados Unidos, Alemania, Inglaterra, Francia y Japón (de Rusia tenemos información muy escasa) se han lanzado a la investigación de estas mineralizaciones y a la preparación de aparatos y métodos a aplicar en la difícil tarea de explotar estas riquezas que, por los datos incompletos de que disponemos, parecen muy importantes.

NÓDULOS. POLIMETÁLICOS

Como antes decíamos, en la expedición del *Challenger*, realizada durante los años 1873-76, se encontraron, por primera vez, en el fondo de los océanos nódulos de hierro y manganeso, que durante mucho tiempo se consideraron como una curiosidad científica. Pero las campañas de investigación submarina, que comenzaron a realizarse intensivamente desde el momento en que la técnica se perfeccionó y las hizo posibles, han puesto de manifiesto la existencia de nódulos polimetálicos en amplias zonas de los océanos, especialmente en el Pacífico, que han atraído la atención de las más importantes empresas mineras.

El interés hacia los nódulos polimetálicos y la posibilidad de su explotación como recurso mineral comenzó a tomar forma hace

poco más de una década, cuando J. L. Mero (The Mineral Resources of the Sea, Amsterdam, 1965) comprobó la concentración y frecuente alto contenido de cobre, níquel y cobalto en los nódulos.

A las campañas de investigación y sondeo comenzadas en 1967 por el barco *Glomar Challenger*, de los Estados Unidos de América, siguieron otras, entre las que por ser de las más modernas destacamos las de los barcos *Marion Dufresne*, francés; campaña Osiris I en 1973 y campaña Nosicaa en 1975, así como la realizada por el barco *Valdivia*, alemán, en el año 1974.

Los nódulos suelen ser esféricos, de apariencia oolítica, con un núcleo generalmente de un mineral muy alterado o una hialoclastita; pero en algunos casos el núcleo puede ser más o menos reemplazado, lo que puede explicar el fenómeno de que algunos nódulos no tengan núcleo reconocible. En otros casos se han reconocido núcleos, no de rocas volcánicas, sino de anteriores nódulos rotos de manganeso, *pellets* de arcilla o dientes de tiburón. Otras veces los nódulos son aplanados con un núcleo laminar. Su talla puede alcanzar cuatro centímetros de diámetro, pero excepcionalmente pueden llegar a tener hasta 20 cm de diámetro.

La composición media de los nódulos del océano Pacífico, según Tooms (Endeavour, septiembre 1972), es la siguiente: manganeso, 17,2; hierro, 11,2; níquel, 0,63; cobalto, 0,36; cobre, 0,36; plomo, 0,047; bario, 0,20; molibdeno, 0,036; vanadio, 0,042; cromo, 0,0012; titanio, 0,69.

La composición de los nódulos polimetálicos varía sensiblemente de una parte a otra del océano, tanto por lo que se refiere a la relación Mn:Fe como al contenido de oligoelementos. Hay también diferencias en el contenido de Ni y Cu en los océanos mayores, siendo frecuentemente mucho mayor en el Pacífico que en el Atlántico y en el Índico. Normalmente, el contenido de cobalto en los nódulos es mayor en los montes submarinos, mientras que las máximas concentraciones de cobre y níquel se encuentran en nódulos de las partes más profundas del océano. En general, en áreas muy extensas del fondo del mar, los nódulos tienen una composición muy semejante, pero excepcionalmente puede existir un área, a veces reducida, en la que la composición sea diferente.

Las concentraciones de Ni y Cu en los nódulos pueden exceder del 2 por 100, con un contenido de Ni normalmente mayor que el de Cu. Según Mero, en un área próxima a Hawai se ha encon-

trado, excepcionalmente, una cuenca que contiene nódulos con concentraciones medias de Ni y Cu que llegan hasta 1,9 y 2,5 por 100, respectivamente. En parte puede intentarse la explicación de estas grandes variaciones de composición, por procesos físico-químicos : donde pueda existir una sedimentación relativamente rápida y una alta productividad biológica, cabe que se produzca una removilización del Mn bajo condiciones reductoras a poca profundidad dentro de los sedimentos, que se precipitará en condiciones oxidantes en el límite sedimento/agua. Los nódulos resultantes tendrán un contenido excepcionalmente alto de Mn, pero bajo de Fe y de muchos otros elementos. En rocas aflorantes, muchos de los elementos pueden proceder del agua del mar, pero otros pueden haberse obtenido de las rocas por meteorización. La existencia en algunas áreas de poblaciones de nódulos de distinta composición es difícil de explicar si no se admite que estas variaciones están controladas por factores locales, fundamentalmente las diferencias de composición del agua del mar, que a su vez pueden ser debidas a la existencia próxima de volcanismo.

CONDICIONES DE SEDIMENTACIÓN

Una de las cuestiones que ofrece un máximo interés es la de averiguar cuáles sean las condiciones sedimentarias que favorecen la formación de nódulos polimetálicos.

Las dos campañas de sondeos efectuadas por el barco Marion Dufresne en el océano Indico Austral, desde el este de Mozambique hasta las islas Kerguelen, primero la campaña Osiris I, efectuada en junio de 1973, y luego la campaña Nosicaa, realizada en junio de 1975, tuvieron por objeto obtener testigos de sondeos que permitieran efectuar un estudio tan completo como fuera posible de los sedimentos atravesados, su fauna y flora fósiles, su facies, velocidad de sedimentación, niveles estratigráficos encontrados y determinación de su edad.

Lucien Leclaire y otros («Bull. Soc. Geol. France», t. XVIII, Paris, 1976) estudian los testigos obtenidos en ocho sondeos seleccionados como más característicos entre los 39 realizados, atendiendo, de una parte, a la situación de las diferentes masas de agua ; zonas ecuatorial, subantártica e intermedia, y de otra, a los diferentes marcos estructurales ; flancos de dorsales activas, cuen-

cas oceánicas, fallas transformantes y mesetas asísmicas. Las profundidades de agua en estos ocho sondeos oscilan entre 2.565 y 4.261 m, y la longitud de testigos varía entre 7 y 17,5 m.

Estudiadas todas las características de estos testigos se ha obtenido la siguiente información : a pesar de los relativamente pocos metros de testigo obtenidos, en tres sondeos se ha llegado al Mioceno, y en los restantes se ha atravesado un Plioceno sobre el que reposa el Pleistoceno medio o superior. Los sedimentos están constituidos en el Mioceno por lodos rojos con zeolitas y óxidos metálicos, y lodos calcáreos o calcáreo-arcillosos. El Plioceno se compone también de lodos calcáreos con cocolitos o arcilloso-calcáreos rojos, y el Pleistoceno contiene lodos calcáreo-silíceos con nanofósiles y lodos calcáreos o arena calcárea con nanofósiles. Son frecuentes las discontinuidades y hiatos de sedimentación, entre el Plioceno y el Pleistoceno, dentro de la serie Pliocena y en el contacto Mioceno-Plioceno.

Muy interesante también es la serie de 14 sondeos efectuados en el año 1974 por el barco Valdivia, desde la meseta de Mascareñas hasta la cuenca Indica Central. La región occidental, caracterizada por la existencia de la meseta de Mascareñas, la dorsal índica media y la prologación de la dorsal Chagos-Laquedivas, está recubierta por lodos calcáreos, que es la sedimentación típica pelágica en la zona ecuatorial durante el Cuaternario reciente. La región oriental, ocupada por el fondo de la cuenca índica central, está tapizada de lodos silíceos o «diatomitas pardas», y sólo en esta región se encuentran concreciones metalíferas asociadas a la facies «diatomitas pardas». Las dos regiones difieren por su profundidad media, pues en la primera los fondos marinos se encuentran entre 2.500 y 4.000 metros ; mientras que en la segunda se sitúan a más de 5.000 metros. Así que parece claro que la naturaleza de los sedimentos y la existencia de nódulos en el océano Indico Central dependen de la profundidad del fondo marino. También es interesante hacer resaltar que la edad de la facies caliza que cubre los fondos de menos de 4.500 metros es Cuaternaria reciente (de menos de 180.000 años), mientras que las diatomitas pardas de la cuenca índica central son más viejas, y su edad va de 0,4 a 1 millón de años. También la velocidad de sedimentación es muy inferior en la cuenca índica central a la de los sedimentos que recubren las dorsales índica media y Chagos-Laquedivas.

Así, pues, desde el ecuador a la zona subantártica se depositan durante el Pleistoceno sedimentos calcáreos de cocolitos, que dan un lodo blanco, y que hacia la zona tropical y subantártica se hace ligeramente silíceo con diatomeas y radiolarios. En el flanco oriental de la meseta de Madagascar esta facies caliza pasa progresivamente a lodos rojos azoicos que ocupan el fondo de la cuenca de Madagascar. Lo mismo acontece en otras zonas de esta región, en las que los fondos de las cuencas están recubiertos de diatomitas verdes o rojas muy pobres en caliza.

Vemos así que hay una variación de facies más acusada según las profundidades en que se presentan, que en relación a las diferencias de latitud. Es decir ; que la naturaleza de los sedimentos recientes en esta parte del océano Indico depende mucho de la profundidad a que se han depositado, y que las facies encontradas están en cierta medida ligadas a las morfoestructuras.

Mientras que el Pleistoceno está constituido por una facies calcárea, el Mioceno e incluso el Plioceno contienen facies roja, lodo rojo o lodo calcáreo-arcilloso pardo, y la fase carbonatada que subsiste ha sufrido una intensa disolución.

En efecto, son múltiples las pruebas de disolución en los cambios de facies lodo calcáreo-lodo rojo. El contenido de carbonato cálcico desciende mucho ; del 80 por 100 a menos del 5 por 100, y la composición de la nanoflora y la microfauna de foraminíferos varía sensiblemente, pues a profundidades crecientes aumenta la importancia de las especies de foraminíferos planctónicos resistentes a la disolución, mientras que los cocolitos muestran los bordes de sus discos corroídos. En el límite no queda en los lodos rojos más que micropartículas de calcita, residuo de la disolución de las plaquetas de cocolitos.

Según estas observaciones, el límite de los lodos rojos se situaría entre 4.500 y 5.000 metros de profundidad, y la que se puede considerar como superficie de la zona de disolución acelerada de la calcita se encontraría en profundidades variables comprendidas entre 3.500 y 4.500 metros. Estas profundidades de redisolución del carbonato varían no sólo de una cuenca a otra, sino con el tiempo.

Estos fenómenos de disolución profunda de los carbonatos constituyen el origen de las facies de lodos rojos y diatomitas pardas, pero no son la única causa de su formación, porque la abundancia de sustancias neoformadas que contienen : zeolitas, óxidos metálicos

en granos y micronódulos y nódulos polimetálicos, atestiguan una autogénesis contemporánea o posterior al depósito.

El estudio de los testigos obtenidos en las campañas del Marion Dufresne pone de manifiesto que, en líneas generales, el espesor de los depósitos sobre las plataformas submarinas es relativamente fuerte, mientras que la cobertura sedimentaria de los flancos de las dorsales, cuando existe, queda reducida frecuentemente a una delgada película, sobre todo en los relieves creados por las fallas de transformación. Tanto en uno como en el otro caso se observan netas lagunas de sedimentación, pero en las zonas de fractura aparece un fenómeno que las diferencia, consistente en una notable reducción de las series sedimentarias. Esta circunstancia es la que ha permitido obtener muestras de la corteza oceánica relativamente antigua. Estas series, muy reducidas, no son fácilmente detectables por los métodos clásicos de la sísmica de reflexión continua, porque el poder de resolución de estos métodos no es suficiente. Esto hace que se haya considerado en algún caso que grandes extensiones de las dorsales índicas medias estaban desprovistas de sedimentos.

Por el contrario, estas series sedimentarias, de muy reducida potencia, constituidas esencialmente por lodos rojos y lodos calcáreo-arcillosos en vías de disolución, e interrumpidas por frecuentes lagunas de sedimentación, que además contienen concentraciones de nódulos de manganeso, ofrecen un interés cada vez mayor.

Los testigos estudiados ponen de manifiesto discontinuidades en la sedimentación o hiatos, que aparecen, tanto en el límite superior del testigo, como en el seno de la serie litológica. Los diagramas de las velocidades de sedimentación establecidos con los datos de algunos sondeos ponen de manifiesto estas interrupciones de sedimentación, cuya importancia es muy variable. En unos casos corresponden a períodos de muy corta duración, y no son perceptibles por los métodos de la estratigrafía clásica, pero se ponen de manifiesto muy bien cuando se emplean los métodos de análisis matemático aplicados a la evolución de las microfaunas de foraminíferos. Otras interrupciones son de gran importancia y dan lugar a la ausencia de uno o varios pisos o subpisos, y entonces constituyen las verdaderas lagunas estratigráficas.

Se ha observado que la duración de los períodos de no sedimentación son bastante comparables. Así por ejemplo, en algu-

nos de los testigos estudiados se observa una laguna estratigráfica con ausencia de Mioceno superior y Plioceno inferior, y otra también importante que afecta al Cuaternario. En otros testigos falta parte del Cuaternario y el Plioceno superior. No parece admisible que estas coincidencias y otras que se han podido observar sean debidas a la casualidad. Es más verosímil que en el origen de éstas lagunas intervenga un mismo fenómeno sensiblemente simultáneo en lugares distantes unos de otros, pero de la misma región. La frecuencia de estas discontinuidades en las series pelágicas del Océano Índico se ha puesto en evidencia por diferentes autores desde Opdyke y Glass en 1968 hasta la campaña Leg 25 del Glomar Challenger, según sendas notas de Leclaire y Sigal en 1974. Un ejemplo neto de laguna estratigráfica lo da el testigo del sondeo 249 de esta campaña, situado en la Meseta de Mozambique. Se ha obtenido testigo del contacto de un lodo del Mioceno que descansa sobre una creta del Cretáceo superior. Sin embargo, en la mayor parte de los casos los testigos no son continuos, lo que hace muy infrecuente la observación de un tal contacto. Entonces los geólogos deducen la existencia de lagunas de sedimentación por las curvas de velocidades de sedimentación, considerando que las series no enteramente extraídas, con velocidad aparente de sedimentación muy reducida, están interrumpidas por hiatos. Esto no siempre puede ser exacto porque velocidades aparentes de sedimentación, muy pequeñas, pueden también ser debidas a series litológicas de espesores muy reducidos, a las que se las denomina «series condensadas».

En efecto; incluso cuando la sucesión estratigráfica parece ininterrumpida, el espesor de estas zonas bioestratigráficas del Plioceno y del Mioceno, en los testigos obtenidos, es muy débil y a esta escala, haya o no paradas en la deposición, la velocidad de sedimentación calculada para cada zona resulta anormalmente baja. A título de comparación, las zonas de nanofósiles del Plioceno calizo sondeadas sobre la dorsal índica occidental por el sondeo 251 del Glomar Challenger tienen un espesor comprendido entre 7 y 20 metros y las velocidades de sedimentación son del orden de 20 metros/M. A. Igualmente, las calizas del Mioceno del testigo obtenido en el sondeo 238 del Glomar Challenger en la proximidad de la dorsal índica central, se han depositado a velocidades de unos 20 metros/M. A.

Se ha observado que el fenómeno de condensación de los depó-

sitos sedimentarios no se produce más que a profundidades superiores a 3.000 metros, pero ello va unido a dos procesos que intervienen en el fenómeno y dificultan la correlación de las dataciones de edades

En efecto ; en las capas de espesor sumamente reducido, la microfauna de foraminíferos planctónicos y la nanoflora aparecen frecuentemente resedimentadas, lo que dificulta la correlación entre las edades obtenidas según la escala bioestratigráfica de los foraminíferos y las que se deducen de la escala de la nanoflora.

Por otra parte, los esqueletos del plancton calizo presentan con frecuencia un estado de conservación muy deficiente. Los cocolitos, foraminíferos y demás organismos microscópicos sufren una disolución muy intensa en estas capas de espesor reducido, fenómeno que, como se ha dicho, corresponde a la zona de disolución acelerada de los carbonatos. El reducido espesor de estas series puede acentuarse todavía más por la existencia de lagunas estratigráficas de corta o media duración aparente

Estas series condensadas parece que se localizan preferentemente en niveles estructurales muy característicos ; los flancos de las dorsales activas y las grandes fallas transformantes en el fondo de las cuencas oceánicas actuales.

En regla general, las series litológicas se diferencian, entre otros caracteres, por su velocidad media de sedimentación, cuando esta es continua, pero en el caso de series condensadas, los valores medios de las velocidades de sedimentación pueden ocultar la existencia de detenciones en la sedimentación. En efecto ; por muy precisa que sea la obtención de los datos, la determinación de las edades del techo y muro proporciona un valor medio de la velocidad de sedimentación, mas no indica si ha podido haber alguna laguna en la serie, en cuyo caso la velocidad real puede ser muy diferente, y los datos que se consiguen no tienen una gran significación.

Es interesante señalar que estas series litológicas de espesor reducido tienen una gran similitud con las series condensadas alpinas descritas por primera vez por Heim en 1934

FORMACIONES POLIMETÁLICAS

Las concreciones polimetálicas que se encuentran en los fondos oceánicos pueden ofrecer dos aspectos : constituyendo costras o en forma de nódulos. En uno de los sondeos se encontró una costra de 5 centímetros de espesor, que contenía una gran cantidad de zeolitas, pero que no puede compararse con las «costras» que recubren en algunos sitios los flancos desnudos de las dorsales. Mas la forma de presentarse las concreciones que se considera más interesante, es en nódulos.

En las investigaciones realizadas en el Océano Indico se han encontrado dos tipos de nódulos : unos aplanados con núcleo laminar y otros subesféricos con estructura de aspecto oolítico. En cuanto al tamaño, hay zonas de nódulos grandes, de tamaños que van de 0,5 a 4 cm. de diámetro, que excepcionalmente pueden llegar a ser de 8 cm., y zonas de micronódulos que oscilan entre un centenar de micras y varios milímetros. Los nódulos aparecen diseminados en el sedimento o concentrados en lechos. Ahora bien ; como estas primeras investigaciones se efectúan mediante sondeos que proporcionan testigos de diámetro relativamente pequeño, el hecho de no encontrar nódulos en el testigo, no quiere decir que no existan, pues pueden estar diseminados, con lo que la sonda puede no haber tropezado con ningún nódulo.

Los bancos de nódulos y la corteza ferruginosa con zeolitas indican, normalmente, la existencia de una laguna de sedimentación, si bien todas las lagunas reconocidas no están ocupadas por nódulos. Estos se localizan en las series litológicas condensadas, lagunares, a que antes se ha hecho referencia, de edad, en la zona que nos ocupa, mio-pliocena. También pueden presentarse de manera preferente en niveles de cambio de facies de lodos rojos a lodos calcáreos de edad pliocena o en facies calizas de esta edad que hayan sido sometidas a una fuerte disolución.

Aunque la no aparición de nódulos en la cara superior de un testigo no quiere decir que no existan en ese nivel, esta idea puede a veces verse apoyada con el hallazgo de varios niveles de nódulos en el mismo testigo, lo que puede indicar que los nódulos más antiguos son más gruesos o los campos más densos.

que los que pueden existir en la superficie de separación agua-sedimento.

Esto parece indicar que para esta zona del Océano Indico, el medio sedimentario del Mioceno superior y del Plioceno inferior es más favorable para el crecimiento de los nódulos que el del Pleistoceno.

La conclusión a que se llega después de los estudios realizados en el Océano Indico, tanto en la Cuenca de Madagascar como en la Cuenca Indica Central, es que los nódulos polimetálicos se encuentran intercalados especialmente en las series condensadas lagunares, localizadas normalmente en la cúspide o las vertientes de las rugosidades del fondo de las cuencas oceánicas.

Por otra parte, las formaciones de nódulos metálicos se han encontrado, tanto en los sondeos efectuados por el Glomar Challenger como por otros barcos, bien en la superficie de los sedimentos o en diferentes niveles de los testigos de sondeo. Los nódulos aparecidos en la superficie de los sedimentos o en sus proximidades inmediatas, se encuentran en estratos del Mioceno, Oligoceno e incluso Eoceno.

De gran interés es el estudio realizado por Bignot y Dangeard (C. R. Som. Soc. Geol. Fr., fas. 3, 1976) sobre nódulos de distintas procedencias del Océano Pacífico, empleando grandes aumentos del microscopio electrónico. Este estudio ha demostrado que los nódulos están envueltos en laminillas concéntricas sumamente finas (del orden de una micra); las laminillas interiores están muy apretadas y forman un conjunto compacto; las periféricas, no siempre tan apretadas, quedan a veces separadas por capas de cocolitos, que, tanto en este caso como cuando se encuentran englobados en las laminillas, aparecen parcial o totalmente mineralizados y su composición química elemental es comparable a la del medio en que se encuentran. Estos cocolitos han podido ser estudiados y clasificados, y los que actualmente se depositan en el Océano Pacífico tropical son idénticos a los mineralizados del interior de los nódulos, sin que se haya encontrado ninguna especie extinguida en éstos. La consecuencia que de estas observaciones se deriva es que la parte periférica de los nódulos es contemporánea del sedimento que los rodea y que la velocidad de formación de estos dos depósitos es sensiblemente la misma.

En la Circum-Pacific Energy & Mineral Resources Conferen-

ce celebrada en Honolulu en agosto de 1974 se trató, entre otros temas, de la existencia de una capa de nódulos de ferromanganeso, en el fondo del Océano Pacífico norte, bajo 4.800 m. de agua. Esta capa se encuentra a unas 500 millas al sur de Hawaii, concentrada en una faja este-oeste de 2.500 millas de longitud y 150 millas de anchura, cuyo interés comercial se deduce de su contenido en cobre y níquel, que llega al 2,5-3 por 100 en el mineral seco. Los nódulos que se encuentran en las capas superficiales del Mioceno, Oligoceno y Eoceno, tienen un mayor contenido en Cu y Ni a medida que el substrato es más antiguo ; y las mayores concentraciones de nódulos aparecen en zonas de montañas submarinas y fracturas, en donde probablemente los volcanes submarinos proporcionan los núcleos sobre los que se desarrollan los nódulos.

Con el fin de explicar la formación de nódulos polimetálicos en los fondos oceánicos, se ha estudiado la velocidad de crecimiento de los nódulos, causa de las lagunas de sedimentación, profundidades batimétricas, naturaleza de las capas en que se encuentran los nódulos, composición del agua y su contenido en materia orgánica, y demás circunstancias que pueden influir en el fenómeno.

Se ha determinado la velocidad de crecimiento de los nódulos en el fondo del mar, que oscila entre 0,5 y 40 mm. en diez millones de años, aunque probablemente de manera no continua. En un modelo formado en el laboratorio se ha comprobado que la norma es un rápido crecimiento y largos períodos de detención, que se produce en la divisoria agua-sedimento ; pero en los períodos de no crecimiento puede producirse erosión en la superficie de los nódulos. Este proceso se produce en zonas o fajas, unas veces laminares, otras masivas y algunas columnares, de espesor variable, que depende del suministro de minerales ; química del entorno, tipos de corrientes submarinas y sedimentación.

Otra circunstancia es la existencia de series condensadas. En éstas, las capas se interrumpen por lagunas de sedimentación, fenómeno que podría atribuirse a tres causas diferentes : una completa detención de la sedimentación pelágica debida a la desaparición de plancton en las aguas de superficie ; erosión de parte de la serie litológica, si descansa sobre una pendiente, por efecto de la gravedad o de la actividad tectónica ; o ausencia de sedimentación por efecto de los movimientos de masas profundas de agua.

La primera hipótesis no es admisible porque no se puede pen-

sar en una súbita detención de la vida en la zona eufótica, reanudada más tarde. Más posible es la segunda causa, porque se conoce algún caso en el que este mecanismo se ha producido. Además, las tarbiditas pelágicas se conocen en diferentes zonas de las cuencas oceánicas y pueden ser el origen de este fenómeno. Pero la causa más probable es la tercera considerada, ya que las corrientes de aguas profundas se conocen en muchas zonas, tanto por pruebas directas como indirectas. Estas detenciones de sedimentación van casi siempre acompañadas de concreciones metalíferas, lo que prueba la relación entre la presencia de corrientes profundas de agua, la no sedimentación y el depósito de concreciones polimetálicas. Pero existen también lagunas importantes de sedimentación, debidas ciertamente a una erosión de los sedimentos por las corrientes del fondo, en las que no se encuentran concreciones metalíferas, lo que demuestra que la formación de éstas no va unida solo y exclusivamente a las detenciones de sedimentación, sino que es necesario tomar en consideración otras circunstancias.

Estas son principalmente la profundidad oceánica y la zona de disolución acelerada de la calcita. Como la profundidad de deposición de un sedimento sobre el flanco de una dorsal oceánica activa varía con el tiempo por razón de la subsidencia de la corteza oceánica, la formación de series concentradas con nódulos metalíferos debe estar regida por aquella subsidencia, el arrastre de sedimentos por el movimiento de aguas profundas y la aparición de la zona de disolución acelerada de la calcita.

Pero es interesante también considerar por qué el crecimiento de los nódulos parece estar favorecido por este fenómeno de disolución de la calcita en aguas profundas. Parece cierto que al poner en disolución el carbonato cálcico, las sustancias metálicas se concentran en los lodos rojos, cuya composición media es muy poco diferente de la de los nódulos. Si hay concentración debe haber también precipitación, y la calcita de los esqueletos de los organismos planctónicos tal vez puede actuar de catalizador de la precipitación de ciertos metales.

Las consideraciones hasta aquí brevemente expuestas tratan de explicar la razón de la existencia de nódulos metálicos asociados a series litológicas condensadas de los fondos oceánicos, pero no parece que se haya llegado todavía a una teoría que aclare de manera definitiva este fenómeno que ha de tener importantes consecuencias para el porvenir de la humanidad.

LOS «POZOS CALIENTES» DEL MAR ROJO

El curioso fenómeno de los «pozos calientes» del Mar Rojo, con sus interesantes mineralizaciones fue descubierto en los años 1963-65 por los barcos Atlantis II, Discovery y Meteor, americano, inglés y alemán, respectivamente, al efectuar investigaciones en el centro del Mar Rojo, entre Port Sudán y Jedda, en una zona en la que en el año 1948 el barco oceanográfico sueco Albatros encontró temperaturas anormales que sólo fueron consideradas como una aislada curiosidad.

Los citados barcos tomaron temperaturas y salinidad del agua a distintas profundidades y sacaron muestras del agua. Los notables resultados obtenidos condujeron en 1966 a un estudio más detallado con el barco oceanográfico Chain de la Woods Hole Oceanographic Institution; igualmente, en abril de 1972 el Glomar Challenger efectuó seis sondeos, tres en la zona primitivamente descubierta, en la que atravesó 359 m. de sedimentos, y otros tres sondeos más al SE., perforando en uno de ellos 325 m. de sedimentos. Por último, en 1973 los barcos alemanes Valdivia y Wando River efectuaron un estudio del agua y de los sedimentos de las zonas calientes, con todo lo cual se dispone de una información, que, si no resuelve definitivamente las causas de este fenómeno, pone de manifiesto la existencia de unas mineralizaciones sumamente interesantes.

En efecto; se han encontrado tres cuencas cerradas, la mayor de las cuales, denominada Fosa Atlantis II, tiene unos 15 km. de largo y 5 km. de ancho. En cada una de las cuencas la profundidad del agua excede de 3.600 m. y están separadas por umbrales a una profundidad menor de 3.000 m. El agua de estas cuencas tiene una salinidad siete veces mayor que la del Mar Rojo normal, la cual a su vez es bastante mayor que la del resto de los océanos. En la proximidad del fondo, el agua está a la temperatura de 56° C y queda recubierta por una capa de unos 40 m. de espesor, de agua más fría a 44° C. Los sedimentos que yacen bajo el agua caliente están formados por una arcilla de colores, amarillo, rojo y azul, que contiene sulfuros de cobre y cinc. El material de las capas coloreadas más claras, desecado, tiene un 4 por 100

de cobre, 9 por 100 de cinc y trazas de plata y oro. Las capas superiores, más oscuras, contienen proporciones menores de metales pero son más potentes. El espesor reconocido en la Fosa Atlantis II, de 8 1/2 m. de sedimentos, se calcula que puede contener más de un millón de toneladas de cobre y cerca de tres millones de toneladas de cinc, pero no se sabe lo que puede haber por debajo de esta capa reconocida. El barco Valdivia ha extraído testigos más profundos, pero la información publicada no da detalles sobre los sulfuros que contienen. En cualquier caso, son cifras interesantes que inducen a estudiar sus posibilidades de explotación y es muy conveniente efectuar reconocimientos más precisos y detallados a fin de conocer con la mayor aproximación posible la riqueza de estos yacimientos y las posibilidades mineras y metalúrgicas de su explotación.

Estos son los datos que hasta ahora conocemos del contenido de estos pozos calientes del Mar Rojo, pero es interesante tratar de explicar las causas y procesos que han conducido a la concentración de esta importante cantidad de sulfuros metálicos, tanto porque su conocimiento puede ayudar a su investigación y explotación, como porque de este conocimiento puede deducirse la existencia de depósitos similares en otros océanos.

Según las ideas que el profesor Bullard sintetiza en el número de mayo de 1974 de la Revista Endeavour, el Mar Rojo se inició al empezar a separarse Arabia de Africa hace veinte millones de años, fenómeno que ha continuado produciéndose a lo largo de todo este tiempo. Al distenderse la corteza se formó primero una depresión y surgió después una grieta por la que ascendieron lavas que se extendieron por el fondo de la depresión. A medida que se fue ensanchando el valle, fue invadido intermitentemente por el mar; primero el Mediterráneo por el norte y luego el Océano Indico por el sur. La conexión con el mar abierto, que ni siquiera actualmente es muy segura, se rompió en el pasado frecuentemente, dando lugar a la evaporación del agua y a la precipitación de sal. Este fenómeno muchas veces repetido, ha dado lugar a la deposición de una gran cantidad de sal que en algún sitio de la costa alcanza un espesor de 4 km. y que se extiende por gran parte de la depresión. Por lo tanto hay que suponer que esta masa de sal se ha formado intermitentemente durante los últimos veinte millones de años a razón de unos centímetros cada

mil años. Durante todo este tiempo el valle del Mar Rojo se ha ido ensanchando, formándose nuevas grietas por las que han ascendido y se han extendido nuevas lavas.

El agua ha podido penetrar a través de las grietas de la sal, hasta alcanzar las lavas, adquiriendo así su elevada temperatura y arrastrando el cobre y cinc de las lavas, que pierden estos metales contenidos en el sólido en cristalización. El agua caliente del mar disuelve la sal del fondo del valle, como lo demuestra la relación de isótopos de la salmuera, que es la misma y característica del agua del mar.

La salmuera de los pozos calientes no retiene los metales en disolución, que se precipitan como sulfuros y se sedimentan en el fondo de los pozos; sin embargo, no hay una evidencia de las causas que producen la precipitación de los sulfuros. Puede ser debido a corrientes separadas de agua caliente hacia los pozos, con hidrógeno sulfurado (procedente de los gases volcánicos); o tal vez haya sulfatos en el agua, procedentes de los depósitos de sal, que las bacterias reducen para formar hidrógeno sulfurado. El estudio de las proporciones de isótopos del azufre (^{32}S y ^{34}S) sugiere que el primer proceso parece el más importante en la Fosa Atlantis II y el segundo en otras depresiones.

Utilizando el carbono 14 y otros métodos se ha comprobado que el tiempo necesario para formar los sedimentos en los pozos calientes es sólo de unos diez a veinte mil años y la velocidad de deposición es de 10 a 30 cm. cada mil años, lo que da valores muchas veces mayores que los normales en aguas profundas.

Una vez realizado el proceso antes expuesto de agrietamiento, salida de lavas, descenso del agua, formación de salmuera y deposición de sulfuros, las lavas, tras unos pocos años, se enfrían y se rellenan las grietas deteniéndose el proceso. A esta fase seguirá una sedimentación normal que cubrirá lentamente el mineral con caparazones de zoo y fitoplancton, y nada indicará la posible existencia de mineral. Posteriormente puede producirse un nuevo agrietamiento en otra zona a lo largo del eje del mar y formarse un nuevo remanso de salmuera. Pero el movimiento de las placas Arábica y Africana, al ir abriendo el mar puede desplazar las mineralizaciones del eje. Por consiguiente, cabe esperar encontrar mineralizaciones en formación en el valle central del Mar Rojo; y, en efecto, las investigaciones alemanas han encontrado otra

fosa con salmuera caliente que parece no contener sedimento mineralizado. También a ambos lados del valle central se pueden encontrar pozos calientes 'fósiles' ya fríos, recubiertos por un sedimento normal marino o incluso por coladas de lava.

Las características que el Mar Rojo ofrece, son infrecuentes. Son raros los mares embrionarios como el que nos ocupa, y por lo tanto no parece fácil encontrar lugares en los que se puedan haber producido pozos calientes como los descritos. Unicamente el Golfo de Aden, que es prolongación del Mar Rojo y el Golfo de California reúnen condiciones similares, pero ni en uno ni en otro se tiene noticia de que existan pozos calientes o minerales sulfurados. El Valle Imperial, prolongación septentrional del Golfo de California, muestra características semejantes a las de éste, pero con la sola diferencia de que no se encuentra cubierto por las aguas. En este Valle, cerca del Lago Salton, se efectuaron sondeos que producen agua mineral caliente, parecida a la de los pozos calientes y que contiene mayor concentración de metales y una proporción más alta de plomo y plata en relación con el cobre que en las salmueras del Mar Rojo, pero el espesor de los sedimentos es grande, lo que dificultaría su eventual explotación, razón probable de que no se haya hecho una mayor investigación minera.

POSIBILIDAD DE MINERALIZACIONES EN MARES ABIERTOS

Las modernas ideas tectónicas sobre los desplazamientos continentales favorecen la posibilidad de que se hayan concentrado mineralizaciones en mares que actualmente ofrecen características diferentes a las del Mar Rojo.

Si el comienzo del Océano Atlántico hubiera sido parecido al del Mar Rojo, cabe la posibilidad de que en las primeras etapas de agrietamiento y ensanchamiento se depositara sal formando pozos calientes rellenos de salmueras mineralizadas, que al ir ensanchándose el océano se desplazarían del eje, pudiendo quedar finalmente bordeando el talud continental y posiblemente recubiertas por sedimentos más recientes.

Parece apoyar esta interpretación el sondeo 105 del Glomar Challenger, perforado en abril de 1970 a 925 km. al SE de Nueva York, bajo 5.251 m. de agua. Se perforaron 633 m., de los que

600 m. eran sedimentos y el resto basalto oceánico típico. El sedimento más profundo acusó una edad de 153 millones de años, y en el momento de su deposición esta parte del Atlántico debía tener una anchura de unos 900 km. Unos 10 m. por encima del basalto se encontró una delgada veta de cristales pequeños de cobre metálico. Más arriba, en materiales depositados hace unos cien millones de años, aparece una capa de 60 m. que se parece a la zona mineralizada del Mar Rojo y que contiene sulfuro de cinc que en algunas motas constituye el 50 por 100 del material. El cobre contenido es menos del 0,1 por 100, a pesar de lo cual fue lo suficiente para teñir de verde el aparejo de sondeo. Estos sedimentos no son explotables económicamente porque su ley media es baja y se encuentran muy profundos, pero como indicio son muy interesantes porque demuestran que los minerales del Mar Rojo no constituyen una excepción, sino que se trata de un proceso que ha podido producirse en otros muchos sitios.

Sin embargo, quedan muchas dudas de difícil solución sobre el proceso de formación de estas mineralizaciones y sobre el período de su formación. Pueden haberse formado sólo en las primeras etapas de desarrollo del océano, quedando entonces confinados en los bordes de los océanos mayores, o, por el contrario, su formación ha podido producirse todo el tiempo que el océano se ha ido agrietando y ensanchando a partir de su valle central. La formación de potentes depósitos de sal parece más fácil y probable mientras el mar es un valle estrecho intermitentemente aislado del mar abierto. También es posible que la salmuera resultante sea necesaria para la formación del mineral y su deposición en el fondo de los pozos calientes. Con la ausencia de una salmuera densa, las soluciones mineralizadas de las rocas volcánicas pueden ser transportadas lejos por las corrientes oceánicas, en vez de ser retenidas y precipitadas como sulfuros.

La isla de Chipre ofrece unas características que resultan muy interesantes en relación con estas mineralizaciones. Su interpretación geológica ha ofrecido serias dificultades, que finalmente han sido aclaradas gracias a los estudios de Gass y otros, como consecuencia de los cuales se ha llegado a la interpretación de que la parte sur de la isla es un trozo de fondo oceánico. En los valles de los Montes Troodos se encuentra el manto superior recubierto por lavas que se extendieron bajo el agua y que a su vez están

cubiertas por sedimentos. Toda esta secuencia ha emergido del mar como consecuencia de movimientos orogénicos entre Africa y Europa, y entre los sedimentos y las lavas se descubrieron importantes depósitos de cobre, que se han venido explotando desde hace 2.000 años, y ahora están casi agotados. Según Drummond Matthews, estos depósitos se formaron en el fondo del mar, por un proceso similar al que ha producido los minerales del Mar Rojo. Cuando se formaron, el Mediterráneo era un amplio océano, parte del Mar de Tethys, y la duda estriba en si se formaron en un mar abierto o si el Chipre actual se encontraba entonces en algún brazo estrecho, más o menos semejante al Mar Rojo.

Otras de las sustancias minerales de interés que pueden proporcionarnos los mares, son las fosforitas. Estas se encuentran en la plataforma continental en forma de gránulos detríticos, nódulos o grandes fragmentos, restos de depósitos formados en el pasado durante períodos de descenso del nivel del mar. No se tenía noticias ni se pensaba en la formación actual de depósitos de fosforita, pero los científicos rusos han demostrado la existencia de fosforitas en formación en sedimentos de la plataforma de Africa del suroeste, lo que concuerda con la existencia conocida en muchas localidades de fosforitas detríticas.

Los requisitos principales para la formación de fosforitas son : una fuerte corriente ascendente de aguas frías, profundas, ricas en fósforo, de las que pueda precipitarse el fosfato, y un ritmo lento de sedimentación. Estas condiciones se encuentran, precisamente, en áreas en donde existen restos detríticos de fosforitas marinas, y cabe pensar que en estos sitios se sigan formando estas fosforitas. Tanto en Africa del suroeste, en donde lo ha señalado la técnica rusa, como en Marruecos y costa occidental de Estados Unidos, se dan estas circunstancias y cabe esperar que se sigan formando nuevas fosforitas.

La fosforita marina tiene una riqueza en P_2O_5 que raramente excede del 30 por 100, por lo que en más baja que la de las fosforitas terrestres, que sufren un enriquecimiento secundario sometidas a meteorización subaérea. Esto, unido a costos más elevados de prospección y explotación, dificulta el aprovechamiento de esta materia fertilizante, que, por otra parte, es cada día más necesaria para la agricultura. La circunstancia de que con frecuencia la fosforita va asociada con uranio, permite su prospección más económica

y rápida mediante el uso de destellómetros remolcados, de registro continuo. Pero en todo caso será necesario que los costos de arranque y transporte sean suficientemente bajos para compensar la menor riqueza de las fosforitas que se pueden extraer de la plataforma continental.

PROSPECCIÓN Y EXPLOTACIÓN MINERA SUBMARINA

Las técnicas para la investigación submarina han alcanzado un desarrollo tan espectacular en los últimos años, que ha permitido disponer de maquinaria y aparatos con los que se ha podido realizar campañas de sondeos en el mar, primero en zonas no demasiado profundas, mediante plataformas ancladas en el fondo, y más tarde el empleo de plataformas libres ancladas mediante radar y sonar, ha permitido ir a profundidades marinas mucho mayores.

Al mismo tiempo, se han ideado aparatos complejos y pesados, que situados en el fondo del mar, a varios miles de metros de profundidad, permiten las complicadas operaciones de sustitución de barrenas y de extracción de testigos del sondeo. Esto ha hecho posible sondear y tener información geológica de los terrenos que constituyen el fondo del mar bajo espesores de agua hasta de seis mil metros.

El afán innato del hombre de conocer cada vez mejor el mundo en que nos movemos, ha hecho que, al disponer de un elemento tan extraordinario para investigar los fondos marinos, se proyectara una sistemática exploración de éstos, y se pusiera en marcha el Deep Sea Drilling Project, que con el barco Glomar Challenger viene realizando desde hace una década sondeos en todos los océanos, que proporcionan un conocimiento cada vez más preciso de la estructura y característica de los sedimentos existentes en las zonas profundas del mar.

Al disponer de esta extraordinaria arma de investigación y de los progresos que la técnica ha alcanzado en todos los dominios, indujo a ciertos organismos y diferentes grandes empresas mineras, a comprobar la información dada por varios barcos oceanográficos y por el Glomar Challenger, sobre la existencia de nódulos y lodos metalíferos en determinados puntos de los océanos, y se lanzaron a la búsqueda, delimitación y evaluación de las áreas en las que

se había detectado la existencia de concentraciones metalíferas, con vistas a su posible aprovechamiento.

Esta es una labor sumamente compleja y minuciosa, en la que se aplica una gran variedad de métodos de técnica avanzada, que requieren la intervención de personas muy especializadas en las diferentes operaciones que hay que realizar.

Para el conocimiento de la estructura sedimentaria del fondo marino se emplean métodos geofísicos, en especial el sísmico de cañón neumático, que proporciona registros de alta resolución, de 4 kHz y métodos de sonar de baja frecuencia, de 3,5 kHz.

En combinación con los métodos geofísicos, se efectúan sondeos que proporcionan testigos de longitudes acordes con las necesidades de la investigación y las dificultades que la operación presenta.

Para el estudio de las concentraciones metalíferas se atiende, no solo a sus posibilidades de explotación, sino a tratar de aclarar las causas y proceso de su formación, lo que puede ayudar a posteriores investigaciones. En este sentido se estudian las características físicas y químicas de los nódulos extraídos; la temperatura y composición del agua inmediata al fondo y a diferentes profundidades, así como el plancton que contiene; las corrientes marinas, sus direcciones y velocidades; y se obtienen grandes cantidades de fotografías del fondo, automáticamente a intervalos regulares, tanto con cámaras fijas en el fondo, que ponen de manifiesto los posibles movimientos de seres vivos, como con cámaras transportadas que barren áreas extensas.

Para la obtención de datos en un lugar fijo se utilizan dispositivos como el Monitor del fondo oceánico (B. O. M.) empleado por el barco Melville de la Expedición Pléyades, que consiste en un trípode que se deposita en el fondo, en donde se le mantiene durante varios meses, en el que se montan cámaras fotográficas, registradores de corrientes marinas con sus direcciones y velocidades, pantalla de radar, receptores y transmisores de datos, flotadores, paracaídas, etc.

Para reconocimientos en extensión, uno de los mecanismos que pueden emplearse es un trineo que se arrastra por el fondo del mar y transporta todos los aparatos necesarios, tal como el de Jacques Cousteau, que puede enderezarse automáticamente si acci-

dentalmente se vuelca. En todo caso, después de haber podido enviar a la Luna un artefacto no tripulado que ha dado información completa de las características de las rocas allí existentes, es evidente que el problema técnico está resuelto.

Respecto a la investigación de los lodos metalíferos del Mar Rojo, además de los métodos aplicables a otros tipos de yacimientos submarinos, puede ser eficaz un método geofísico de resistividad eléctrica, que probablemente no detectará los minerales, pero puede detectar la salmuera suprayacente. También la prospección geoquímica orientada a buscar en el agua y los sedimentos trazas de cobre y cinc o gases volcánicos, puede ser un auxiliar importante. Por último, los sulfuros en presencia de la salmuera pueden oxidarse ligeramente, actuar como baterías eléctricas y producir diferencias de potencial capaces de indicar la existencia de concentraciones metalíferas.

La obtención de muestras del fondo que permitan efectuar el estudio de los nódulos y de los sedimentos en que se encuentran, se efectúa mediante el empleo de sacatestigos de diferentes tipos, como son los de pistón, mandíbulas y caja. Este último sistema es muy interesante, pues permite obtener, mediante el hincamiento en el fondo del mar de una caja de superficie de unos 0,5 por 0,5 metros, muestras del sedimento existente en el fondo. La especial y compleja disposición de este mecanismo permite proporcionar testigos de las dimensiones de la caja, en los que los sedimentos y los nódulos que pueden existir llegan a la superficie con la menor alteración posible en su disposición y en las condiciones más próximas a las que tenían *in situ*.

Para obtener este resultado hay que conducir la operación con un gran cuidado e izar la caja muy lentamente hasta la cubierta del barco, a fin de evitar que el movimiento del agua al elevar rápidamente la caja, altere la disposición de la muestra e incluso pueda arrastrar parte de ella. De esta manera, y sometiendo inmediatamente el testigo a una temperatura igual a la existente en el fondo del mar y aislándolo del contacto con el aire, se pueden conservar muy análogas todas las condiciones, excepto, naturalmente, la presión que soportan los sedimentos bajo capas de agua de varios miles de metros, ya que las diferentes manipulaciones a que se han de someter las muestras no permiten mantenerlas bajo presión.

Con los testigos obtenidos por los diferentes sistemas, mantenidos a la temperatura de 4° C y en la oscuridad, se efectúan muchos ensayos físicos y químicos sistemáticos, y además se procede a la extracción del agua intersticial para la determinación de los diferentes compuestos contenidos, así como las trazas de metales. Esta extracción se efectúa mediante presión, a fin de no alterar las características de los fluidos intersticiales.

Con los testigos se realizan también diferentes ensayos mecánicos con vista a los problemas que puede ofrecer su arranque en una futura explotación, y son especialmente interesantes los ensayos de resistencia a la penetración, que se efectúan con muestras sacadas de los testigos de caja.

Esta compleja, variada y abundante serie de operaciones, ensayos y datos, que se obtienen en las sucesivas campañas de investigación, proporcionan un copioso material cuyo estudio permite llegar a conclusiones sobre la riqueza del depósito metalífero encontrado y sus condiciones de yacimiento. Si éste ha quedado bien delimitado, la riqueza metálica y el tonelaje son importantes y las condiciones en que se presenta, así como la profundidad a que se encuentra permiten preveer un costo de extracción que haga la explotación rentable, se pasará a programar esta explotación.

Si el yacimiento es somero, los métodos a emplear serán los mineros muy experimentados, sin variación sensible o muy pequeña. En el caso de mineralizaciones próximas a la costa, que sean prolongación de yacimientos explotados en tierra firme, su arranque puede hacerse mediante un pozo en la costa y una galería submarina que parta del pozo. Si se trata de gravas someras o placeres de ilmenita, casiterita, rutilo, etc., la explotación tampoco ofrece dificultades extraordinarias, pues puede hacerse con dragas acomodadas a las condiciones locales y de profundidad.

Por el contrario, los minerales detectados y reconocidos en mares profundos plantean a la minería problemas nuevos para los que no se tienen soluciones ya experimentadas. Así, pues, han tenido que desarrollarse nuevos métodos y dispositivos apropiados a estas nuevas circunstancias, que no se puede preveer el resultado que van a dar y las dificultades que pueden surgir en el curso de su aplicación. Acerca de estos problemas se tiene noticia de que algunas grandes empresas multinacionales, interesadas en estos problemas, han puesto a punto métodos y maquinarias que han

sido ensayados y experimentados, y cuyos resultados hay que suponer satisfactorios.

Los minerales del Mar Rojo presentan unas características diferentes a las de los nódulos polimetálicos, pues se encuentran en lodos blandos, por lo que no será necesario triturar y moler para separar las diferentes partículas minerales, lo que constituye una gran ventaja sobre la mayoría de los minerales metálicos de tierra firme. Probablemente será posible, mediante una pequeña agitación en el fodo, bombear los lodos hasta una plataforma flotante, mantenida en posición por el mismo procedimiento que se utiliza en las plataformas de sondeo. Al llegar el material a bordo será necesario eliminar la mayor parte de la salmuera y la mayor cantidad posible de la arcilla y carbonato cálcico, para lo que es conveniente algún tipo de separador cetrífugo, pues de lo contrario se verían obligados a manipular una enorme cantidad de toneladas diarias.

El separador centrífugo podrá proporcionar sulfuros metálicos mezclados con una gran cantidad de óxidos de hierro, lodo y algo de arena. El tratamiento metalúrgico tradicional de fusión de un mineral de este tipo no parece que se pueda aplicar fácilmente en el mar, pues la instalación de hornos y el suministro de combustible y fundentes resultaría complicado y antieconómico. Si hubiera de emplearse este método tradicional, probablemente sería más conveniente extraer de la centrifugadora el mineral parcialmente seco, para trasladarlo a una refinería en tierra. Una variante podría ser ensayar un tratamiento por vía húmeda, bien utilizando compuestos químicos obtenidos del aire y del agua del mar, tales como ácido clorhídrico, amoniaco, ácido nítrico, sosa cáustica, hidrógeno y oxígeno, o suministrados parcialmente de tierra. En cualquier caso, sobre el problema técnico está el económico, y será preciso tener muy en cuenta los costos de estas operaciones para decidir sobre su viabilidad.

En el caso de los nódulos polimetálicos, que hoy por hoy es el que más interesa a las empresas, el problema del arranque y elevación hasta una plataforma es de más difícil solución, pues ya no se trata de un lodo, sino de gránulos de tamaños variados y a veces relativamente grandes, que reposan sobre un sedimento que habrá que elevar juntamente con los gránulos, pero que constituye el estéril cuyo transporte no interesa.

En estas condiciones el tratamiento se complica. Es posible

que en muchos casos sea necesaria una previa agitación del fondo que permita su posterior arrastre y elevación mediante el empleo combinado de dragas y bombeo hidráulico o tal vez neumático.

Esta es, sin duda, la operación más compleja, que presenta dificultades tan grandes como nuevas, y a las que la moderna técnica se ha esforzado en hallar la forma de vencerlas, lo que sin duda ha conseguido, si bien sus métodos y maquinarias no son todavía del dominio público.

Una vez el todouno sobre la plataforma, desaparecida la complicación que representa tener que trabajar bajo una capa de agua de varios miles de metros, la separación de los nódulos y su subsiguiente tratamiento metalúrgico ofrece problemas que, aunque de difícil solución, han de ser menores que los que ofrece la etapa anterior.

En primer lugar es necesario efectuar una separación mecánica de los nódulos, a fin de reducir todo lo posible el peso y volumen del material que probablemente habrá que transportar a tierra firme para su ulterior tratamiento metalífero. Por lo tanto será necesario instalar a bordo la maquinaria necesaria para concentrar todo lo posible el mineral. El tipo de instalación más conveniente dependerá de las características que en cada caso ofrezca el todouno.

EL PROBLEMA JURÍDICO

La minería es una de las ramas de la técnica en la que los problemas jurídicos influyen de manera más decisiva, favoreciendo o dificultando y entorpeciendo las tareas de investigación y de explotación de los recursos minerales. En España pueden citarse casos en los que una legislación desfavorable ha retrasado notablemente el desarrollo de empresas mineras; y esto mismo está sucediendo actualmente con los problemas que plantea la explotación de minerales de los fondos marinos, no ya por la existencia de disposiciones legales, sino por la ausencia de una reglamentación, realmente muy difícil de establecer, dadas las especiales características que concurren en la exploración y explotación de los minerales existentes en el fondo de los mares profundos.

Mientras la técnica de que se disponía sólo permitía operar económicamente sobre yacimientos o placeres muy someros, o

sobre yacimientos petrolíferos de la plataforma continental, el tratado internacional de 1958 que establecía que en esta zona, desde luego no muy bien definida, la prospección y explotación de las riquezas contenidas en el mar quedaba bajo el control del país que posee la tierra más próxima, los países ribereños han podido actuar y se han obtenido resultados notables como es la riqueza petrolífera del Mar del Norte.

Pero el rápido avance de las técnicas de prospección submarina, que han puesto de manifiesto la existencia de concentraciones metalíferas en fondos marinos bajo capas de agua de varios miles de metros, ha planteado el problema de la explotación de recursos minerales existentes en zonas muy alejadas de la plataforma continental.

La situación creada requiere soluciones nuevas y una reglamentación muy especial, a la que es sumamente difícil llegar dados los contrapuestos intereses que concurren.

El concepto de tierra firme más próxima, que se establece en el tratado de 1958, conduciría a soluciones absurdas y notoriamente injustas, como sería, por ejemplo, el caso del Pacífico sur que concedería el control de la zona fragmentado entre los poseedores de los miles de atolones existentes, muchos de ellos deshabitados.

Por otra parte, parece lógico y equitativo establecer que los bienes existentes en las extensas áreas fuera de la plataforma continental y de la zona económica exclusiva de doscientas millas, benefician a la humanidad entera, tanto a los países pobres del tercer mundo, como a los ricos y poderosos.

Pero las condiciones económicas y el desarrollo de la técnica de los países del tercer mundo, no les permite a éstos realizar las costosas inversiones que requiere la investigación y, en su caso, explotación de los recursos minerales submarinos, ni disponen de los elementos y personal técnicos y científicos necesarios.

Por el contrario, la economía de los países ricos y desarrollados les permite hacer frente a los cuantiosos gastos de estas operaciones y disponen de técnica suficiente y experimentada para la investigación y prospección en mares profundos. En cuanto a la explotación de los yacimientos submarinos, es evidente que los Estados Unidos, y seguramente otros países, tiene ya a punto la técnica y los elementos necesarios para aquella y están en condiciones de comenzar en cualquier momento.

Prueba de esta posibilidad es que, precisamente mientras se celebraba en Ginebra la reunión de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, en 1975, la empresa Deepsea Ventures Inc. reclamaba el derecho exclusivo a explotar un yacimiento de nódulos, sobre una extensión de 60.000 km², en el fondo del Océano Pacífico entre Hawaii y la costa mejicana. Exponía que piensa dragar el primer año unos 1,35 millones de toneladas de nódulos, y que llegaría a 4 millones si las circunstancias del mercado lo permiten. Que sus instalaciones de tratamiento le permiten obtener durante el primer año 253.000 toneladas de manganeso, 11.300 de níquel, 9.150 de cobre y 2.150 de cobalto. Esta declaración, decía, se basaba en la legislación internacional vigente, y en su virtud dirigía esta declaración a una serie de Embajadas en Washington y de empresas americanas, japonesas y francesas.

Posteriormente se constituye un consorcio de compañías, entre las que se encuentran la International Nickel Co. of Canada Ltd., Sedco Inc. de Dallas (Texas) y Deep Ocean Mining Co., esta última en representación de importantes empresas japonesas y de Alemania Federal, destinado a la explotación de nódulos de manganeso de los fondos oceánicos.

Otro consorcio constituido para la explotación de nódulos del Océano Pacífico y recuperación del níquel, cobre, cobalto y molibdeno, está integrado por las empresas Kennecott Copper Corporation, Río Tinto Zinc a través de su filial RTZ Deep Sea Enterprises Ltd., Consolidated Goldfields, British Petroleum, Mitsubishi y Noranda. Y parece que la Billiton de la Shell ha realizado un acuerdo con la Lockheed para la exploración del fondo del mar.

Estos botones de muestra indican la inquietud y prisa de diferentes empresas por iniciar la explotación de los fondos marinos, y la administración de Washington urge para que se llegue a los acuerdos internacionales que permitan realizar estas explotaciones, pues de no tener en un plazo breve resuelto este problema, Washington estaría dispuesto a promulgar unilateralmente una legislación que permita a las empresas americanas iniciar sus trabajos. Sin embargo, es dudoso que sin tener un firme respaldo basado en un convenio internacional, se atreva una empresa o un consorcio de ellas a iniciar una operación de tal envergadura.

Ello justifica que las Naciones Unidas se hayan preocupado de este problema e intenten darle una solución legal satisfactoria para todos. Con este fin, la Asamblea estableció en 1968 la Comisión sobre la Utilización con Fines Pacíficos de los Fondos Marinos y Oceánicos, fuera de los límites de la Jurisdicción Nacional, la que confeccionó una Declaración de Principios de los Fondos Marinos y Oceánicos y de su Subsuelo, que fue aprobada en la Asamblea General de diciembre de 1970. Al mismo tiempo la Asamblea acordó convocar la Tercera Conferencia sobre el Derecho del Mar, que celebró sesiones en Nueva York en diciembre de 1973, en Ginebra en marzo de 1975, y de nuevo en Nueva York en agosto de 1976 y en mayo de 1977.

En la Declaración de Principios se establece, entre otros muchos, los siguientes, que considero fundamentales :

Los fondos marinos y oceánicos y su subsuelo fuera de los límites de la jurisdicción nacional, así como los recursos de la zona son patrimonio común de la humanidad.

La zona no estará sujeta a apropiación por Estados o personas y ningún Estado ejercerá soberanía sobre parte alguna de ella.

Las actividades de exploración y explotación se regirán por el régimen internacional que se establezca.

La zona estará abierta a la utilización exclusivamente para fines pacíficos.

La exploración de la zona y la explotación de sus recursos se realizarán en beneficio de toda la humanidad.

Se establecerá un régimen internacional aplicable a la zona y sus recursos, y que incluya un mecanismo apropiado para hacer efectivas sus disposiciones.

En la sesión celebrada en Ginebra se elaboró un texto único para fines de negociación, en el que se señala la posibilidad de que cada nación establezca una zona económica exclusiva, no mayor de 200 millas náuticas medidas desde la línea de base que sirve para medir el mar territorial. El estado ribereño gozará de derechos de soberanía para explorar y explotar sus recursos naturales.

Fuera de los límites de la jurisdicción nacional, la extensa área que comprende el resto de los mares y océanos, constituye lo que se denomina «la zona», para la que se establece que sus recursos

son patrimonio común de la humanidad y demás condiciones antes citadas.

También se prevé el establecimiento de una Autoridad Internacional de los Fondos Marinos. Esta Autoridad deberá ser la Organización por la que los Estados deberán administrar conjuntamente la Zona. Así, esta institución tendrá un carácter nuevo en la historia de la humanidad y los importantes recursos no se aprovecharán sólo en beneficio de un país o grupo de países. Según este proyecto, la Autoridad podrá realizar la explotación de minerales por conducto de su propia Empresa o mediante acuerdos con Estados o sus nacionales, siempre que la Autoridad conserve el control sobre las actividades de exploración y explotación en la Zona.

Otras cláusulas se ocupan de la plataforma continental, los Estados sin litoral, los Estados formados por archipiélagos, la protección y preservación del medio marino y la resolución de controversias mediante la creación de un Tribunal.

A pesar del trabajo realizado en Ginebra en 1975, y a pesar de las esperanzas puestas en las sesiones de 1976 y 1977 en Nueva York, los resultados obtenidos son muy escasos. Una de las principales dificultades estriba en el deseo de los países desarrollados (léase Estados Unidos) de utilizar sus propias empresas mediante acuerdo con el Organismo Internacional, y en el del tercer mundo que quiere que las explotaciones se efectúen directamente por el Organismo que se cree, ante el temor de que, por el otro procedimiento, los países ricos se lleven la parte del león.

Como, en cualquier caso, la Autoridad Internacional que se cree necesitará forzosamente para realizar su función de explorar y explotar los fondos marinos, contar con la tecnología, maquinaria y técnicos procedentes de los países ricos, que son los únicos que disponen de medios para atacar este problema, no se ve una salida fácil a este callejón.

Por otra parte, los Estados Unidos insisten en su interés en que se resuelva el problema de la explotación de minerales procedentes de los fondos marinos, pues existen varios importantes consorcios internacionales dispuestos a iniciar las operaciones de extracción tan pronto como exista una legislación internacional que proteja las cuantiosas inversiones que tendrán que realizar. Por

ello dicen que si no se llega a una decisión, los Estados Unidos promulgarán su propia legislación.

Con objeto de salir del punto muerto en que se hallan los debates, la Delegación Norteamericana ofreció a las naciones en vías de desarrollo, ayuda tecnológica y económica para explorar y explotar sus propios recursos mineros submarinos. A pesar de ello, el deseo largamente sentido de hallar solución a este árduo problema, sigue sin cumplirse.