

LAS DORSALES OCEÁNICAS: VULCANISMO, HIDROTERMALISMO Y YACIMIENTOS DE METALES DE MAÑANA

El inmenso océano es engañoso. Parece inmutable y eterno. Durante siglos, los geógrafos, geólogos y oceanógrafos consideraron el océano como una especie de receptáculo pasivo donde se acumularían los productos de la erosión continental y los esqueletos de los micro-organismos del plancton, que viven en la superficie del mar.

Sabemos hoy que los espacios oceánicos, incluso los más vastos, son dominios efímeros, cuyas dimensiones se modifican continuamente a lo largo de los tiempos geológicos.

El fondo de los océanos es móvil. De natura basáltica, está formado en

continuo al nivel de una inmensa cadena volcánica submarina, la dorsal oceánica mundial. El fondo de los océanos se aleja de manera simétrica de esta cadena con la velocidad media de unos centímetros por año mientras nuevas erupciones volcánicas se desarrollan en la zona axial de la dorsal

(Fig. 1). Este movimiento de doble "cinta transportadora" es naturalmente insensible, inapreciable a la modesta escala humana pero a la escala del millón de años (la unidad de tiempo para los fenómenos geológicos), la "cinta" se desplaza de varias decenas de kilómetros. Y en decenas de millones de años, los fondos

oceánicos se encuentran a centenas o incluso a millares de kilómetros de la dorsal oceánica que los ha creado.

Dentro del cuadro de la teoría de la Tectónica de placas, este proceso se conoce como "*crecimiento continuo de los fondos oceánicos*". En la otra extremidad de la "cinta", la vieja costra oceánica, enfriada y más densa, acaba tarde o temprano por volver a las profundidades del manto terrestre, de donde procedía. Se hunde al nivel de las grandes fosas oceánicas entrando en las *zonas de subducción*, que destruyen tanta superficie oceánica como se crea al nivel de la dorsal mundial (Fig. 1).

1. La dorsal oceánica mundial

Mientras estáis leyendo estas líneas, millares de volcanes activos, escondidos debajo de varios kilómetros de

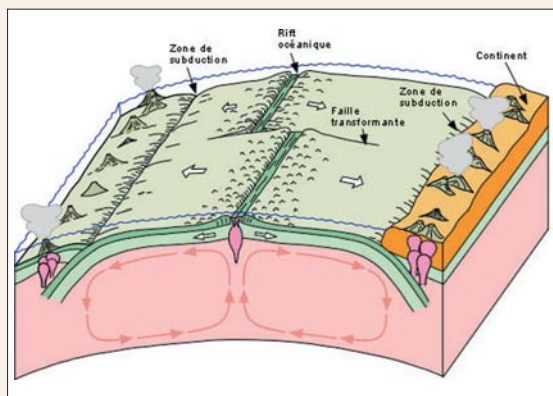
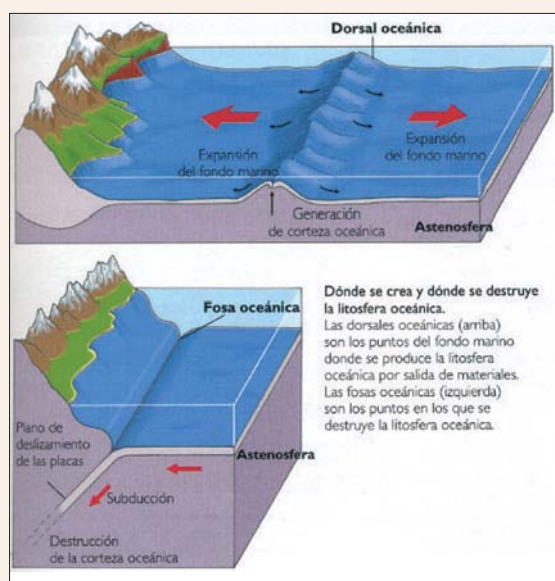


FIG. 1. Acreción y subducción de la costra oceánica.

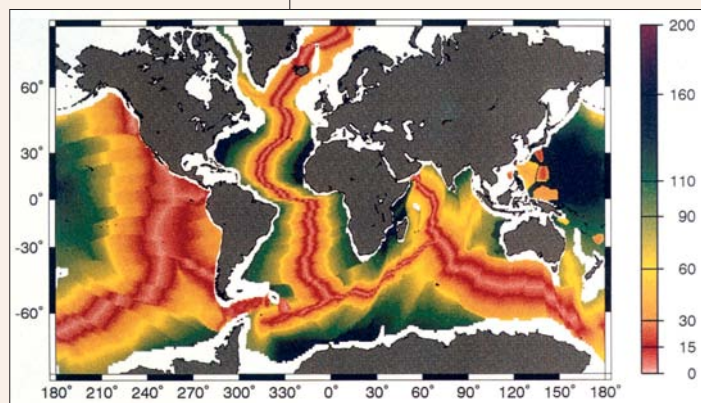


FIG. 2. Mapa de la dorsal oceánica mundial, con indicación de la edad de la costra oceánica, en millones de años (escala de derecha). Notar la simetría perfecta de las edades, que van creciendo con la distancia al eje de la dorsal.



Thierry Juteau

Profesor emérito de la Universidad de Brest

Recibido: 10/10/05

Aceptado: 27/10/05



FIG. 3. El submarino científico francés *Nautile*, buceando en el Océano Pacífico.

agua del mar, escupen sus lavas basálticas sobre el piso oceánico. En la superficie del océano nada permite sospechar la increíble intensidad de esta actividad submarina.

La dorsal oceánica es la cadena volcánica activa más larga de la Tierra (Fig. 2). Es también, y por mucho, la fuente principal de rocas magmáticas, volcánicas y plutónicas, en la superficie del globo. Con una producción media de tres millones de km³ de basalto por millón de años, la dorsal produce cinco veces más lavas que todos los volcanes del *Cinturón de fuego del Pacífico*, y diez veces más que todos los volcanes *intra-placas*, como los de Hawai o la isla de La Reunión, por ejemplo.

Esta inmensa cadena volcánica es totalmente submarina (salvo algunos lugares donde la conjunción con un *punto caliente* hace emerger la dorsal, como en Islandia). Se extiende sobre más de 60.000 km de longitud atravesando todos los océanos del globo. Sus relieves, de 1000 a 3000 km de anchura, ocupan cerca de un tercio de la superficie total de los océanos. La cresta de la dorsal culmina en medida a - 2.500 m de profundidad, dominando de 2,5 a 3 km las vastas llanuras abisales que la separan de los continentes.

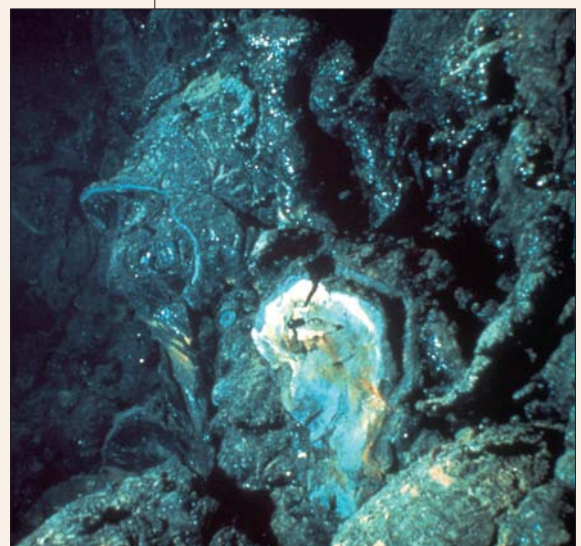
Por fin, hay que añadir a esto las zonas de crecimiento oceánico secundarias que aparecen detrás de los arcos-insulares volcánicos, en varias

cuencas del Pacífico, por ejemplo (cuencas de Fidji norte, de Lau, de Woodlark, etc.) Como veremos, estas zonas tienen un gran interés económico para la búsqueda de metales.

2. El vulcanismo submarino de las dorsales

Debajo de la capa sedimentaria blanda que cubre el fondo de los océanos, el zócalo duro que constituye la parte alta de la corteza oceánica está formado en todas partes por coladas de basalto. Centenares de perforaciones (sondeos) en todos los océanos del mundo por los programas internacionales DSDP (*Deep Sea Drilling Project*) y luego ODP (*Ocean Drilling Program*) lo han verificado ampliamente. Esta capa basáltica, con un espesor de varios centenares de metros, ha sido creada y emplazada a lo largo de la dorsal oceánica mundial. Ocupa una superficie de 360 millones de km², una superficie muy superior a la de los continentes.

FIG. 4. En el eje mismo de la dorsal del Pacífico, el vidrio basáltico brilla bajo la luz de los proyectores. No hay ni sedimento, ni rasgos de vida



Este vulcanismo abisal queda todavía mal conocido. Ninguna erupción profunda ha podido ser observada de cerca hasta ahora. Hace 32 años, en el verano 1973, científicos franceses y americanos lanzaban la "Operación Famous", la primera campaña de buceos profundos con submarinos habitados, construidos especialmente para explorar la geología de los fondos oceánicos. El objetivo era explorar el *rift*, este valle profundo que corta la cresta de la dorsal medio-Atlántica, en una zona situada a unos 700. al sur de las Azores, y verificar sobre el terreno la realidad de la expansión continua de los fondos oceánicos. Los buceadores maravillosos descubrieron por la primera vez un mundo atormentado y fascinante de volcanes submarinos, de lavas basálticas negras y vidriosas, brillantes bajo la luz de los focos, de fisuras abiertas y de muros de fallas gigantes. ¡Estaban tocando a dedo una "frontera de placas", el eje mismo de la gran dorsal, formidable fábrica de costra oceánica!

Esta gran operación abrió un periodo de exploración intensiva de los fondos oceánicos, gracias a dos "herramientas" realmente extraordinarias, operativas en el principio de los años 1970 : el pequeño submarino habitado y el buque-perforador. El primero (Fig. 3) permite pasearse sobre el fondo del océano, fotografiarlo y filmarlo, recoger muestras de rocas o de fluidos, y medir *in situ* varios parámetros físicos y químicos. El se-



FIG. 5. Tubos de "pillow lavas" basálticos, bajando el pendiente de un volcan submarino (dorsal del Pacifico).

gundo permite, gracias a sondeos continuos y recogida de testigos en pozos de forraje, estudiar la composición y estructura vertical de la costra oceánica y de los sedimentos que la cubren.

La zona volcánica activa de la dorsal forma una faja estrecha, generalmente de menos de un kilómetro de ancho, en el eje mismo de la dorsal. Esta zona activa se caracteriza por el aspecto negro y brillante del vidrio volcánico (Fig. 4), por el número importante de frágiles protuberancias vidriosas en la superficie de las lavas, y por la total ausencia de sedimento y de fauna. A esas profundidades, las brechas de explosión no se observan nunca: los gases no pueden vesicular ni formar burbujas y se quedan disueltos en el magma dada la enorme presión hidráulica transmitida por varios kilómetros de agua del mar. El magma basáltico emitido a una temperatura de 1200 °C sufre un temple sumamente brutal cuando hace irrupción en el agua del mar helado a unos 2 °C. El efecto de este temple térmico sobre la morfología de las coladas de basalto depende principalmente del volumen de lava emitido:

- La emisión de volúmenes moderados de lava produce invariablemente la formación de lavas en almohadas ("pillow lavas" en inglés), constituyendo cuerpos efusivos con morfologías variadas, nunca planas, principalmente en forma de tubos (Fig. 5).

- La emisión de volúmenes muy importantes de lava resulta en la formación de cuerpos efusivos con morfología esencialmente plana: lagos de

lava, coladas fluidas y coladas masivas. Las erupciones fisurales muy voluminosas producen lagos de lava (Fig. 6). El temple térmico tiene poco efecto sobre un volumen muy amplio de lava emitido por una ancha fisura. La masa incandescente de lava rellenará todas las depresiones topográficas encontradas en su camino, formando un verdadero lago de lava temporaria

cuya superficie, plana sobre varios km², contrasta con los tubos entremezclados de *pillow lavas*.

3. Chimeneas negras y oasis abisales de faunas hidrotermales

Apenas consolidada en la zona axial de la dorsal, la joven costra oceánica formando el nuevo piso oceánico es inmediatamente expuesto al contacto del agua del mar, que se infiltra por todas las fisuras y huecos, por todos los poros de la capa basáltica. La interacción entre el agua del mar y las rocas de la costra oceánica produce profundas modificaciones de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de la costra oceánica. Por otro lado, esos intercambios químicos contribuyen en controlar la química del agua del mar, y en mantener constante su composición en los océanos.

Las consecuencias métalógicas de la interacción basalto-agua del mar al nivel de las dorsales son muy importantes. El descubrimiento, en el año 1979 sobre la dorsal del Pacífico, de fuentes hidrotermales calientes precipitando sulfuros polimetálicos ricos en hierro, cobre y zinc (los famosos "black smokers"), y también óxidos de hierro y de manganeso, ha sido extendido luego a todas las dorsales oceánicas y a las cuencas trasarcos insulares volcánicas.

Hay que distinguir dos tipos de regimenes de convección del agua del mar dentro de la costra oceánica:

1. Los sistemas de *convección activa* están estrictamente localizados en la zona axial de la dorsal, por encima de los techos de las cámaras magmáticas, donde el calor esta extraído. En esos sistemas, la temperatura es elevada ($T > 300$ °C), y la circulación hidrotermal es vigorosa y rápida.

2. Los sistemas de *convección pasiva* se desarrollan fuera de la zona axial, el calor esta por el enfriamiento lento de la costra y de la litosfera oceánica. Las temperaturas son mucho más bajas ($T > 200$ °C) y las velocidades de circulación mucho más lentas que en la convección activa. Esos sistemas pasivos son menos espectaculares que los sistemas activos, y por consecuencia mas difíciles de detectar y estudiar. Son ellos, sin embargo, que evacuan la mayor parte

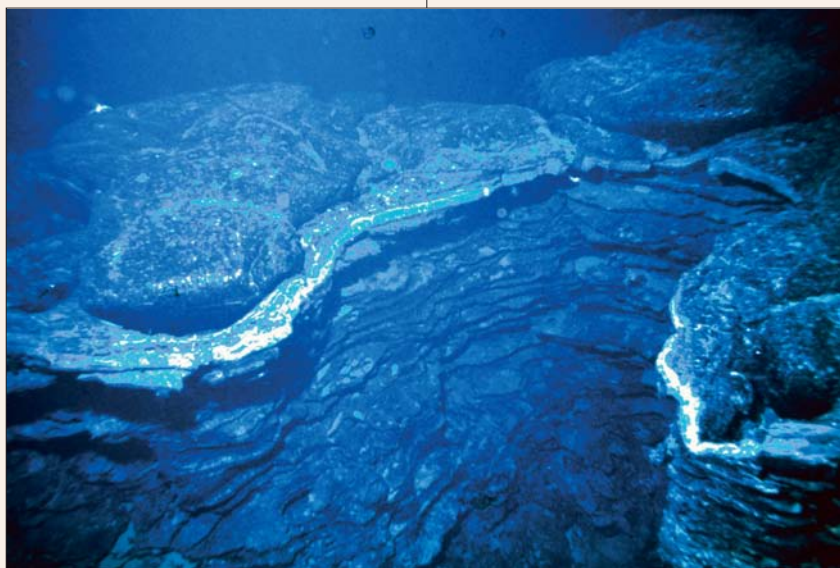


FIG. 6. Lago de lava basáltica, en la zona axial de la dorsal del Pacifico.

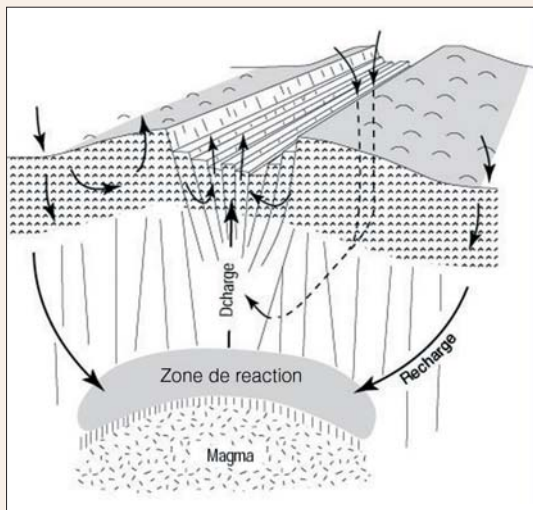


FIG. 7. Esquema mostrando las varias partes de un sistema hidrotermal submarino. El agua fría del mar penetra y baja dentro de la costra, por anchas zonas de recarga y reacciona con las rocas de la costra a unas temperaturas crecientes durante su migración hacia abajo. Reacciones químicas de alta temperatura se desarrollan en la Zona de reacción, justo encima de la fuente de calor (o sea, la cámara magmática). Desde allí, los fluidos hidrotermales suben rápidamente hacia la superficie, por zonas de descarga bien focalizadas, o difusas.

del calor, por lo menos diez veces más que los sistemas activos.

La figura 7 enseña las diferentes partes de un sistema hidrotermal activo al nivel de una dorsal oceánica. Este sistema comprende numerosas zonas de recarga descendientes, por donde el agua del mar fría penetra dentro de la costra y se acerca del techo de la cámara magmática, reaccionando con los basaltos atravesados, y con temperaturas crecientes. En la "zona de reacción de alta temperatura" (ZRHT), el agua del mar se ha transformado en un fluido hidrotermal caliente y cargado de metales disueltos y de azufre reducido. Este fluido de poca densidad en condiciones muy cerca de las condiciones críticas sube hacia la superficie, y se canaliza en zonas de descarga focalizadas o difusas. Así se dibuja una verdadera circulación convectiva del agua del mar a través de la costra oceánica.

Cuando irrumpe en el suelo oceánico, dentro de un agua del mar helado, el fluido hidrotermal precipita en masa sus sales disueltos, bajo la forma de sulfuros poli metálicos: esencialmente pirita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), blenda (ZnS), con un poco de galena (PbS). También precipita en masa blanca el sulfato de calcio (CaSO_4). Así nacen esos edificios polimetálicos en forma de chimeneas, llamados *black smokers*, por el color negro de fluido caliente (350°C) que sale chorreando de ellos. Una parte de la carga de sales disueltos se que-

se depositan lentamente sobre los basaltos de la zona axial alrededor del campo hidrotermal, formando encostramientos de color negro.

En resumen, una verdadera circulación convectiva del agua del mar a través de la joven costra oceánica, intensamente fisurada como hemos visto, permite explicar la actividad de los *black smokers* y el depósito de sulfuros poli metálicos en la zona axial de las dorsales oceánicas. En efecto, las tres condiciones esenciales para desencadenar una convección están idealmente reunidas en la zona axial:

1. La presencia de un fluido convector: es el agua del mar, un depósito inagotable.
2. La existencia de una permeabilidad suficiente del medio: esta permeabilidad, que permite al agua del mar de circular efectivamente a través de la costra, es creada por la intensa fracturación de la capa basáltica, dentro del contexto tectónico extensivo de la expansión de los fondos oceánicos.



FIG. 8. Concentración de gusanos tubícolas *Riftia*, alrededor de unos "black smokers" (dorsal del Pacífico).

3. La existencia de un motor térmico: para poner el agua del mar en movimiento y crear células convectivas, se necesitan diferencias de temperaturas importantes, mantenidas durante largos periodos de tiempo. Las cámaras magmáticas de las dorsales, rellenas de magma a 1200°C , constituyen un motor térmico ideal. Entre el techo de las cámaras a 1000°C , situado a 2-3 km de profundidad, y la superficie del piso oceánico a 2°C , el gradiente térmico es enorme, entre 350 y 500°C/km , o sea entre diez y veinte veces el gradiente geotérmico normal (33°C/km en Europa...).

Un gradiente térmico tan enorme desencadena obligatoriamente una vigorosa convección hidrotermal en la costra donde se puede distinguir, como hemos visto, zonas de recarga (zonas múltiples y difusas por donde el agua del mar desciende dentro de la costra), y zonas de descarga, zonas mucho más focalizadas, donde el agua calentada a más de 350°C y cargada de metales disueltos sube hacia la superficie. Los caudales medidos a la salida de las chimeneas son del orden de uno a varios m^3/s .

Ocurre que el agua de mar frío descendiente encuentre aguas calientes ascendientes, bajo el suelo oceánico. En este caso, el fluido hidrotermal diluido y enfriado precipita su carga metálica en profundidad, y sale en la superficie tibio y limpio, formando "difusores blancos" cuyas aguas tibias (entre 20°C y 150°C) salen con caudales mucho más moderados.

Una característica muy aparatosa de los *black smokers* es que están rodeados por una densa fauna hidrotermal, constituyendo verdaderos

“oasis de vida” sobre el suelo oceánico. A esas profundidades, el fondo del océano es un verdadero desierto biológico dada la pobre aportación en elementos nutritivos cayendo de la lejana superficie del mar. Los *black smokers* sueltan en su entorno grandes cantidades de CH_4 , CO_2 y sobre todo SH_2 , provocando la proliferación de bacterias anaerobias. Esas bacterias viven en simbiosis con todo un ecosistema de invertebrados (gusanos *tubicolos Riftia* y *Alvinella*, clams *Calyptogena*, etc.) y de vertebrados (cangrejos, peces, pulpos...), formando unas concentraciones de materia viva entre las más elevadas del medio oceánico (Fig. 8). Las biomásas llegan hasta la cifra increíble de $50\text{--}100\text{ kg/m}^2$, y esto en pleno desierto abisal!...

Ahora entendemos mucho mejor cómo numerosos yacimientos de metales fósiles, hoy terrestres, se formaron en los océanos del pasado. Empezando por los yacimientos de sulfuros polimetálicos ricos en cobre explotados en las *ofiolitas*, esos fragmentos de litosfera oceánica arrastrados sobre los márgenes continentales o sobre los arcos insulares volcánicos. Muchos de ellos contienen concentraciones explotables de cobre, hierro y zinc, con trazas a veces interesantes de oro y plata. Esos sul-

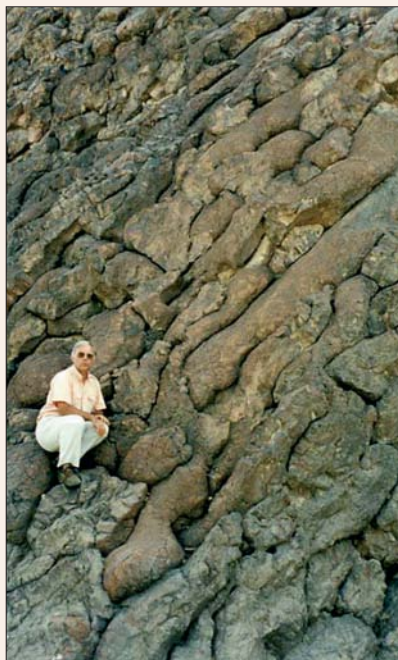


FIG. 9. "Pillow lavas" de la ofiolita de Oman: una dorsal oceánica fósil de cien millones de años.

furos se presentan como acumulaciones en la superficie de antiguas coladas basálticas submarinas (con pillow lavas), exactamente como en la zona axial de las dorsales actuales (Fig. 9). Además, esas masas de sulfuros (Fig. 10) están constituidas por trozos y fragmentos circulares de antiguas chimeneas hidrotermales, y contienen a veces restos fósiles de

faunas hidrotermales. Por ejemplo, esos tubos fosilizados descubiertos en 1985 dentro de los sulfuros de la mina de cobre de Bayda, en las ofiolitas de las montañas de Oman, de cien millones de años. La morfología de esas huellas de tubos evocan sin duda las colonias de *Alvinella*, esos gusanos proliferando sobre las chimeneas activas de la dorsal del Pacífico.

Las analogías son tales que se impone la conclusión de que esas concentraciones de sulfuros polimetálicos de las ofiolitas, conocidas y explotadas en Chypre, Omán, Turquía, Terra-Nova o Filipinas, representan antiguos depósitos hidrotermales formados por la actividad de *black smokers*, en la zona axial de dorsales oceánicas hoy desaparecidas...

4. Conclusión

Durante los 25 últimos años de exploración de los océanos, numerosos depósitos de sulfuros polimetálicos fueron descubiertos sobre el piso oceánico profundo, en sitios geológicos variados. Todos esos depósitos tienen en común (1) la proximidad de una fuente de calor, induciendo la circulación hidrotermal del agua del mar a través de las rocas fracturadas, y (2) la mezcla del fluido hidrotermal con el agua del mar ambiente, provocando la precipitación de sulfuros metálicos y de otros minerales en la superficie o justo debajo del piso oceánico.

Esos depósitos contienen fuertes concentraciones en cobre, hierro, zinc, plomo, bario, manganeso, cobalto, oro y plata. Algunos de ellos pueden llegar a varios millones o decenas de millones de toneladas, comparables a depósitos análogos explotados en tierra firme.

No lo dudemos: durante el siglo XXI, cuando se agoten las reservas de metales en las minas terrestres, el hombre ira buscando esos metales por debajo del mar, como lo ha hecho para los hidrocarburos, empezando por las enormes reservas polimetálicas de la dorsal oceánica mundial. ■



FIG. 10. El prospect mineralizado de Zuha (ofiolita de Oman). Esa colina roja es un yacimiento masivo de sulfuros de hierro, cobre y zinc, interpretado como un campo hidrotermal fósil. El color rojo se debe a la oxidación casi completa de los sulfuros.