

LES CIÈNCIES

per George W. Wetherill i Charles L. Drake

48 (320/especial 1981

ciència 5/6)

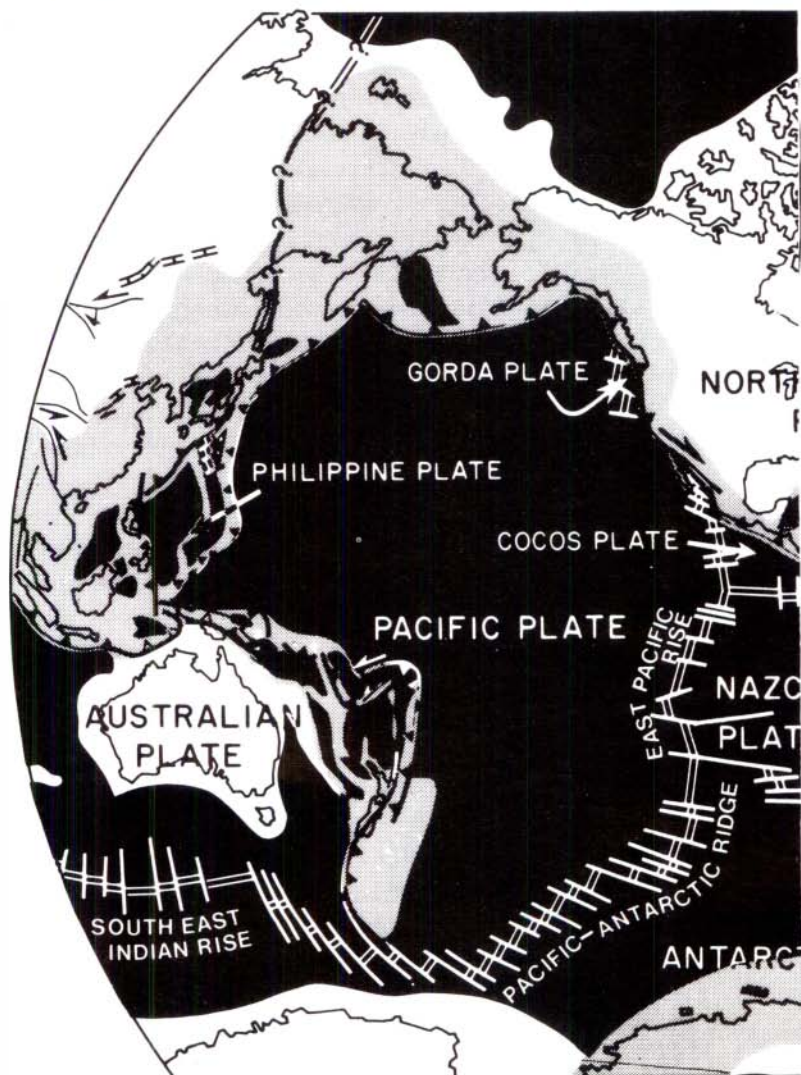
Durant les dues darreres dècades, la comunitat científica s'ha posat d'acord que la Terra és un cos dinàmic; una màquina que funciona gràcies a la seva pròpia calor interna. La manifestació superficial més important d'aquest dinamisme ha estat la fragmentació de la part externa terrestre i, en conseqüència, el relatiu moviment horitzontal, a gran escala, dels fragments. La força motora és la convecció interna de la Terra, però encara queda molt per aprendre sobre la naturalesa de la convecció així com sobre la composició de l'interior de la Terra. Els altres planetes de característiques similars mostren evidències d'haver estat alguna vegada calents, però llurs superfícies fan suposar una estabilitat des de fa molt temps i una absència evident de convecció continuada.

G.W. Wetherill és el director del departament de magnetisme terrestre de la Carnegie Institution de Washington, Washington D.C. 20015. C. L. Drake és professor de ciències de la Terra al Dartmouth College, Hanover, New Hampshire 03755. El seu article fou publicat amb el títol *The Earth and Planetary Sciences* a "Science", vol. 209, pàgs. 96-104, el 4 de juliol del 1980. Copyright 1981 de l'American Association for the Advancement of Science

7 LA TERRA ÉS COM UNA MÀQUINA

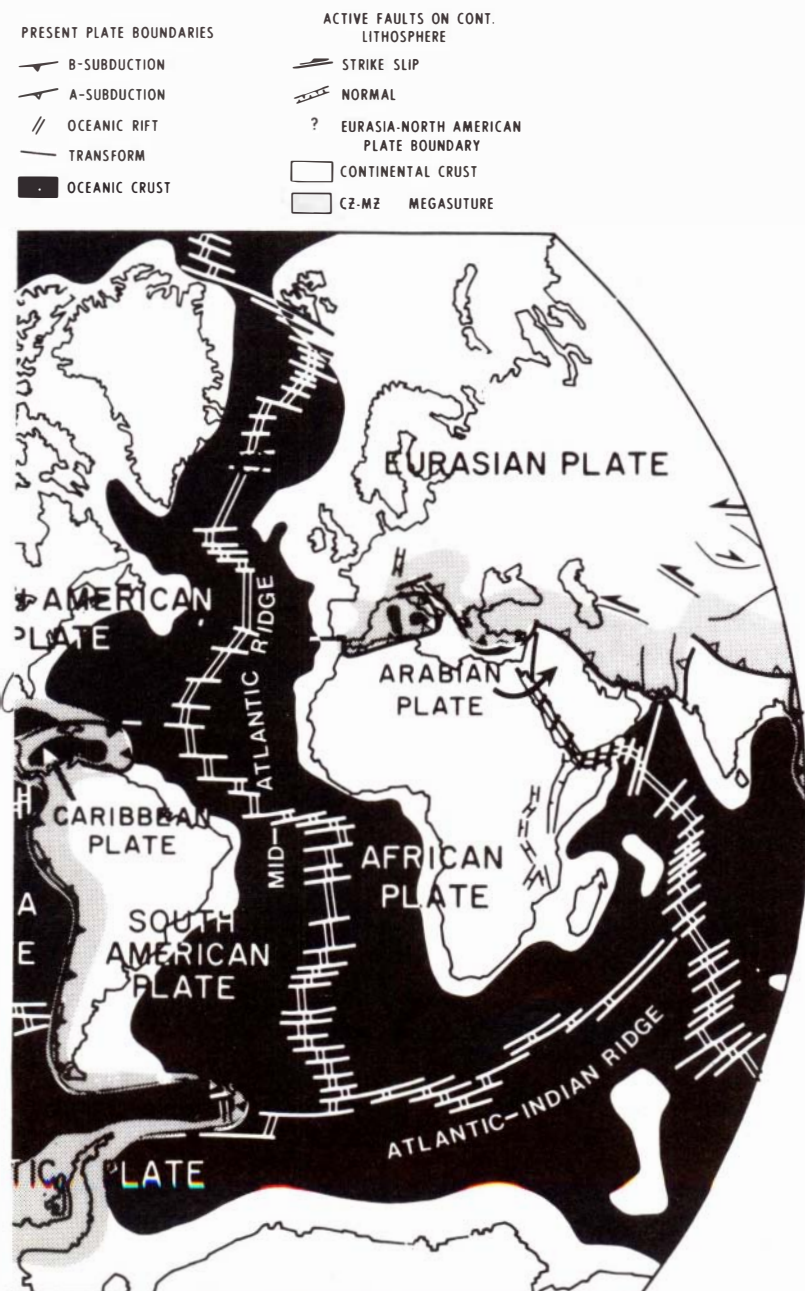
La Terra significa moltes coses per a molta gent, i és vista de diferent manera segons siguin pagesos, exploradors, prospectors, poetes o científics els qui la mirin. Probablement, però, la seva imatge més significativa sigui que és l'únic lloc on es coneix l'existència de vida intel·ligent, mentre que des del punt de vista físico-químic no és probable que sigui un planeta gaire especial. No obstant això, físicament el planeta representa la base on s'ha desenvolupat la vida, i és de crucial importància comprendre la seva naturalesa físico-química, no solament per als geòlegs, sinó també per als biòlegs i altres científics.

Des d'un punt de vista purament físic, la Terra s'ha descrit com una "màquina de calor". Actualment és clar que això no és tan sols una metàfora, sinó que és totalment cert. Gran part de les actuals investigacions que es realitzen sobre ciències de la Terra van destinades a comprendre com opera aquest complex sistema termomecànic. A més a més, aquest nou enfocament, naturalment, porta a considerar les coses que podem aprendre de la Terra en estu-



DE LA TERRA

fig. 1 Les plaques de la litosfera. Les àrees oceàniques contenen roques de l'escorça formades a les dorsals durant els últims 200 milions d'anys. L'escorça corresponent, creada o deformada pels processos de compressió durant aquest mateix període, és continguda en les megasutures d'edat Cenozoica-Mesozoica (CZ-MZ). Aquestes grans sutures estan generalment limitades, per una banda, per les zones de terratrèmols associats a l'enfonsament de la litosfera oceànica (subducció B), i per l'altra, per l'enfonsament que no comporta una activitat sísmica important en els continents (subducció A). En elles es troben les serralades modernes. L'activitat sísmica i volcànica es concentra al llarg de les dorsals o d'aquestes megasutures. Aquestes zones actives divideixen la capa exterior de la Terra, la litosfera, en un cert nombre de plaques esfèriques que es desplacen les unes respecte a les altres. El conjunt d'aquests moviments donarà lloc a la tectònica de plaques. (A.W. Bally, Shell Development Company).



diar altres planetes. Les peces mòbils de la màquina són els mateixos materials de la Terra: la litosfera, que és constituïda per l'escorça sòlida i la part més externa del mantell; la part interna —més profunda— relativament plàstica; l'atmosfera fluida; els mars i el nucli extern. Les fonts d'energia que mou la màquina són principalment nuclears: la radiació solar termonuclear i la desintegració radioactiva dels isòtops de llarga vida a l'interior de la Terra; a tot això s'ha d'afegir les restes de l'energia gravitacional produïda quan la Terra es va formar, fa 4.500 milions d'anys. Quantitativament, l'energia solar que rep la Terra és més gran que la que genera al seu interior, prop de 10^{12} megavats, comparada amb 10^7 MW. El moviment del vent i l'aigua, per tant de la majoria dels processos geològics externs, depèn d'aquesta energia solar. Això no obstant, aquesta font de calor té poca influència en l'escalfament de l'interior. Fins i tot a la temperatura relativament baixa de la superfície terrestre, la pèrdua tèrmica deguda a la radiació del cos negre és suficient per a contrarestar pràcticament la quantitat d'energia rebuda del Sol. Pel que fa referència als processos interns de la Terra, la temperatura d'equilibri de la superfície (uns 300 °K) actua senzillament com una superfície limitadora relativament freda. La generació de l'energia interna, encara que més feble és més significativa en els processos dinàmics interns de la Terra. La calor queda atrapada per les mateixes roques on es forma, fins que l'acumulació d'energia eleva la temperatura prop o per sobre del punt de fusió d'aquestes. En aquestes elevades temperatures la viscositat que assoleix el material és suficientment baixa per a permetre el transport convectiu de calor fins a la superfície. Hem de reconèixer, però, que la Terra és una màquina molt ineficaç quan la considerem com a tal. Malgrat que el percentatge d'energia produïda a l'interior de la Terra per la desintegració radioactiva és comparable al percentatge d'energia consumida per la civilització humana, l'energia cinètica associada al moviment resultant de les grans plaques de la litosfera és menor que la que seria necessària per a escalfar l'aigua d'una tassa de te. No obstant això, en els cents de milions d'anys de la història de la Terra, aquest moviment gradual ha bellugat els continents i els oceans de tal manera que ara ens és difícil reconstruir amb precisió la geografia de la superfície terrestre més enllà d'un petit límit de l'edat de la Terra. Fins aquest segle, els estudis geològics es limitaven a les porcions superficials dels continents:

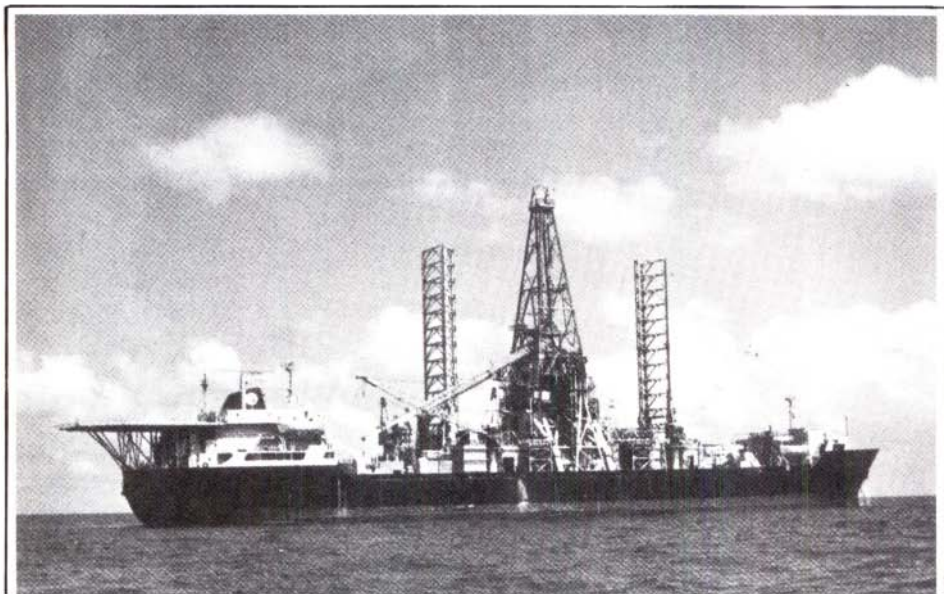


fig. 2 El "Glomar Explorer". Aquest vaixell pot ésser considerat el que reemplaçarà el "Glomar Challenger", que ha estat perforant les profunditats marines des del 1968. La gran envergadura que té permetrà utilitzar els instruments necessaris, com torres d'elevació i mecanismes de bloqueig, per poder controlar en tot moment la perforació. D'aquesta manera, l'"Explorer" podrà perforar la gran quantitat de sediments que es troben acumulats en els límits dels continents. Aquestes regions ofereixen un gran interès científic. Els marges passius han suportat la història de la formació de les conques oceàniques; els actius tenen l'empremta de les deformacions associades a les col·lisions de les plaques convergents. L'"Explorer", a més, té la potència suficient per a perforar fins i tot més profunditat de l'escorça oceànica del que era possible amb el "Challenger", així com per a poder obtenir dades paleogeogràfiques de latituds altes (per cortesia de Robert Bauer, Global Marine).

la part situada entre la regió influïda pels processos provocats pel flux de l'energia solar i els originats pel moviment intern. La interacció no lineal de la gran varietat de fenòmens que en resulten fa que es barregin els efectes de les dues fonts d'energia. La resolució d'aquest problema ha estat i continua essent un gran repte per als científics. Per exemple, no fa gaire més de deu anys es tenia per totalment correcte la idea que la causa principal de la formació de muntanyes eren els processos superficials, és a dir, el complex resultat final de la deposició de sediments en les conques que voregen els continents, com pot ésser el golf de Mèxic. Un altre exemple, aquest més actual, és el fet que encara no sabem distingir clarament quines característiques geològiques d'una roca ígnia provenen del mantell i quines tenen llur origen en la interacció amb ambients més superficials.

LA REVOLUCIÓ DE LA TECTÒNICA DE PLAQUES

Durant els últims vint anys ha tingut lloc una gran revolució de la ciència que estudia el nostre planeta. Va sorgir arran d'una sèrie d'opinions minoritàries que, amb la força de l'evidència i de la persuasió, es van convertir en les creences de la majoria. Mentre que en el passat sempre s'havia emfasitzat la importància de les forces i dels moviments verticals com a responsables de la topografia i de l'estructura de la superfície del globus, ara es considera que aquests no són sinó productes relativament secundaris dels desplaçaments horitzontals de grans fragments de la capa més externa de la Terra. Com que aquests fragments es desplaçaven uns respecte als altres, produïen carenes de muntanyes allà on xocaven, nova escorça allà on se separaven i grans falles transformants allà on relliscaven els uns sobre els altres, com la falla de San Andres a Califòrnia (fig. 1). El concepte bàsic dels moviments relatius dels continents no era nou; el que sí que ho era eren les noves proves que el transformaven en un fet acceptat. Moltes d'aquestes proves es van obtenir gràcies als estudis del geomagnetisme. Fa temps que hom sap que el camp magnètic de la Terra té una font dinàmica, en comptes d'ésser produït per un imant permanent, ja que varia d'intensitat i de posició. L'origen més lògic és el nucli de la Terra, donat que segons els estudis sismològics, el nucli es comporta com

un líquid i és constituït principalment per ferro metàl·lic, un conductor. Els moviments d'un fluid en un medi conductor d'aquest tipus dins d'un camp feble ja existent poden incrementar aquest últim fins al punt detectat per les observacions. Encara que la simetria dels desplaçaments requereix que el camp estigui aproximadament orientat al llarg de l'eix de rotació, la polaritat del camp és tota una altra qüestió. Hom no coneix cap bona raó perquè estigui en la direcció actual, i no en la contrària.

Al principi dels anys seixanta es van realitzar una sèrie de mesuraments molt precisos de la polaritat del camp magnètic emmagatzemat en les roques, juntament amb l'aplicació de nous mètodes per a calcular el temps que trigaren a magnetitzar-se. Així, hom va poder demostrar que el camp magnètic s'invertia en una escala de temps d'entre 10^5 i 10^6 anys. Els mesuraments dels temps d'inversió en les roques dels diferents continents van mostrar que aquests fenòmens tenien lloc simultàniament a nivell global. Això va permetre establir una "escala de temps d'inversió" per a les roques de la Terra. De la mateixa manera, hom va descobrir que les variacions del camp magnètic a l'escorça oceànica, mesurades perpendicularment a l'eix de la dorsal del centre de l'oceà, eren correlacionables amb les inversions del camp magnètic en el temps. Així es va concloure que el fons del mar és com una gravadora gegant i que la nova escorça es magnetitza segons la polaritat del camp en el moment de la seva formació. Llavors, l'escorça, juntament amb el mantell superior sòlid, se separa de l'eix de la dorsal en una mitjana d'uns quants centímetres per any. Aquestes dades concorden amb l'observació que la majoria dels terratrèmols i de les activitats volcàniques que tenen lloc avui dia en les conques oceàniques apareixen associats als eixos de les dorsals on es crea nova escorça.

Durant l'última dècada, el "projecte de sondeig dels fons oceànics" i la continuació d'aquest —la "fase internacional de perforació oceànica"— han estat extremament útils per a definir la història i l'estructura de l'escorça oceànica, la naturalesa i la distribució dels sediments del fons marí, i les conseqüències sedimentològiques, climatològiques i oceanogràfiques dels models de la tectònica de plaques (fig. 2). Una de les primeres contribucions d'aquests treballs va ésser confirmar que era correcta la deducció, obtinguda a partir de les dades magnètiques, que l'edat de l'escorça oceànica augmenta amb la distància a l'eix de la dorsal.

Per allotjar els nous materials que s'injecten al llarg de les dorsals oceàniques sense que hi hagi

expansió de la Terra, s'ha d'eliminar la vella litosfera (fig. 3). Aquest procés té lloc en l'altre cinturó de terratrèmols i volcans, situat en l'oceà Pacífic, que s'estén des d'Indonèsia, travessa l'Himàlaia i s'acaba als Alps. En tota aquesta zona, els terratrèmols tenen lloc a unes profunditats de 700 km pel cap baix, i les dades sismològiques indiquen que l'escorça oceànica i la litosfera són arrossegades fins a profunditats similars o més grans encara. En aquestes àrees és més difícil d'establir la mitjana de desplaçament, però si és de l'ordre d'uns quants centímetres l'any, llavors els materials poden desaparèixer en una mitjana similar a la de formació en els eixos de les dorsals.

El model de la tectònica de plaques aporta una explicació molt versemblant de la història, la naturalesa i fins i tot de la topografia general de l'escorça oceànica, que ocupa un setenta per cent de la superfície terrestre aproximadament. Aquesta escorça oceànica tan prima (té un gruix aproximat de 5 km) recobreix la litosfera oceànica, sòlida, la qual s'estén per sobre de l'astenosfera, més plàstica i parcialment fosa. La topografia del fons oceànic es pot explicar mitjançant un model tèrmic relativament senzill que concorda amb les dades sismològiques referents al gruix de la litosfera i amb les dades sobre el flux de la calor a través del fons oceànic. A mesura que l'escorça i la litosfera se separen de la dorsal, la litosfera es refreda, cosa que fa que l'astenosfera es transformi en litosfera. La capa resultant constituïda per l'escorça oceànica, més gruixuda i densa, juntament amb el mantell superior, perd alçada a mesura que augmenta l'edat i la distància a l'eix de la dorsal. L'enguixament és ràpid al principi i s'acosta asimptòticament al gruix de la litosfera (uns 85 km). Tot això ens indica que les dorsals oceàniques no són masses discontinues que sobresurten en les conques oceàniques, sinó que representen les parts més noves de l'oceà, on es troben les majors elevacions.

Aquesta nova interpretació de la topografia marina té tota una sèrie d'implicacions que també afecten els continents. Una d'aquestes és que l'àrea de l'elevat fons oceànic adjacent a la dorsal pot ésser funció de la velocitat de generació de l'escorça oceànica. Donat que aquesta dada no és constant, seria esperable que durant els períodes de generació ràpida els oceans es desplaçessin i inundessin els continents; aquests adquiririen, doncs, l'aspecte d'illes envoltades per mars poc profunds. En els períodes en què la velocitat de generació fos més petita, els oceans es retirarien de les àrees continentals. Aquesta interpretació pot explicar la darrera

fig. 3 Nova Caledònia. La gran serralada de Nova Caledònia és formada per roques procedents de la litosfera oceànica. Representa una llesca de litosfera que es va precipitar sobre l'illa fa uns trenta milions d'anys. Aquest esdeveniment, produït per la tectònica de plaques, té una considerable importància econòmica, ja que les roques de Nova Caledònia contenen menes importants de níquel (fotografia de C. Drake).



gran inundació dels continents que va tenir lloc fa aproximadament uns 80 o 100 milions d'anys, que és quan es creu que va haver-hi un període de ràpida formació d'escorça.

LA FORMACIÓ DE LES ESCORCES OCEÀNIQUES I CONTINENTALS

Els estudis realitzats al laboratori sobre la composició química i mineralògica de les roques volcàniques basàltiques de les dorsals oceàniques mostren una gran uniformitat, fins i tot a nivell global, el que demostra que provenen d'un mantell astenosfèric subjacent relativament homogeni i parcialment fos. La química dels elements traça i la composició isotòpica dels basalts mostren que el mantell del qual procedeixen no té les mateixes característiques per a tota la Terra, ja que se li han esgotat molts dels ions litòfils més grans com el potassi, el rubidi, l'estronci, el bari, l'urani, el tori i terres rares. Aquesta disminució sembla que està tenint lloc des de fa molt més dels 200 milions d'anys que tenen les actuals conques oceàniques, en concret des de fa uns 1.700 milions d'anys i fins i tot més. En canvi, no tenen el mateix origen les roques basàltiques presents en algunes illes, com poden ésser les Açores o Samoa. Aquestes mostren les característiques d'una font molt més heterogènia i més rica en els grans ions constituents del basalt que la zona de la qual procedeixen la majoria dels basalts de les dorsals. No es coneixen encara bé les raons d'aquestes diferències. La suposició més estesa és que la font dels basalts de les illes s'ha originat a partir de nivells més profunds del mantell i que hi ha una certa quantitat de material fos que puja fins a la superfície en forma de "plomes" o "bombolles", travessant l'àrea més homogènia on s'originen els basalts de les dorsals.

Les àrees oceàniques són joves. Només representen uns dos-cents milions d'anys, l'últim cinc per cent de la història de la Terra. Per tant, estan tèrmicament immadures i són relativament fàcils d'interpretar, ja que han estat afectades tan sols per una petita quantitat de processos i esdeveniments tectònics. Les regions continentals "suren" perquè llur densitat mitjana és menor. Quan una placa de la litosfera que porta al damunt un tros d'escorça conti-

mental col·lideix amb la litosfera oceànica, aquesta última s'enfonsa. D'aquesta manera els continents poden sobreviure més temps de la història de la Terra. En canvi, les conques oceàniques només tenen una existència passatgera.

Conseqüentment, els continents són molt més complexos. Contenen el que resta del norantacinc per cent de la història del planeta. La majoria de les àrees continentals han estat afectades per múltiples esdeveniments tectònics, i llurs superfícies continuament han estat subjectes a processos de meteorització i erosió produïts per la major influència de l'energia solar. Aquests processos geològics superficials tenen uns efectes químics a baixa temperatura comparables en magnitud (però de naturalesa més complexa) amb el fraccionament químic que acompanya la formació dels basalts oceànics. És difícil, però, encertar a dir fins a quin punt la naturalesa granítica de l'escorça continental és una conseqüència directa d'una introducció de material des del mantell, i també fins a quin punt s'ha de comptar amb la influència dels processos químics superficials; aquests últims són els que acompanyen la sedimentació, el metamorfisme i la fusió dels sediments i dels materials profunds de l'escorça per formar roques granítiques. Malgrat aquestes dificultats, haurem de comprendre aquestes roques si mai volem entendre millor els processos tectònics ocorreguts en un passat relativament recent. Els oceans antics han desaparegut per sempre; per a poder tenir, doncs, un coneixement de la configuració de la Terra antiga, haurem de desxifrar el complicat registre geològic continental. A més a més, aquesta informació és incompleta. Una part important de la història estructural dels continents està amagada sota la gran quantitat de sediments més recents (fig. 4).

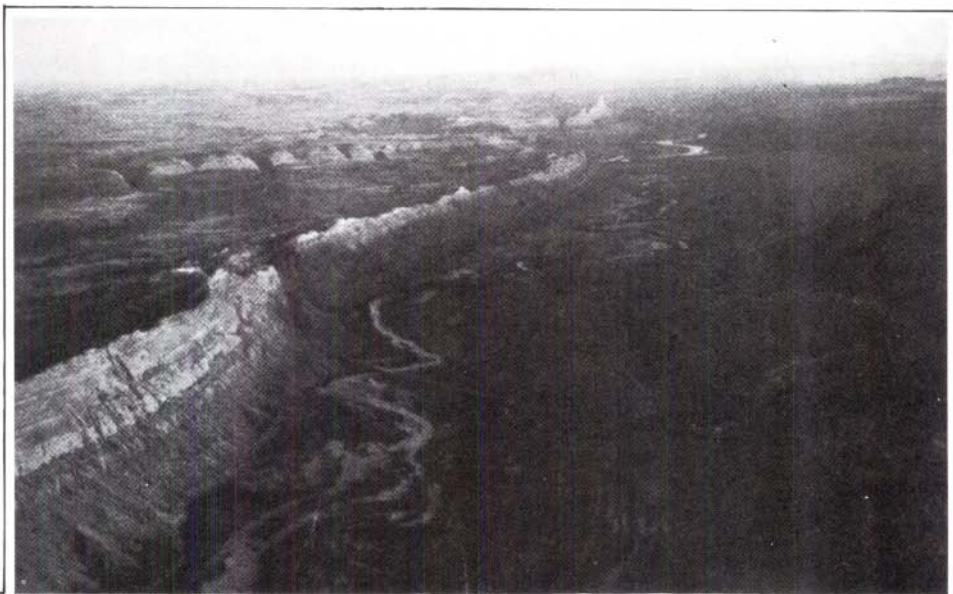
Hom ha fet molts sondeigs en els continents, però la majoria són, bé poc profunds, o bé estan fets en conques de sedimentació en cerca d'hidrocarburs. Durant els últims anys s'ha començat a realitzar una sèrie de programes de perforació amb finalitats molt variades que possiblement es podran utilitzar per a prospectar nous recursos, així com altres sondeigs amb finalitats únicament científiques a fi de reduir la nostra ignorància sobre la distribució, el caràcter i la història de les roques més antigues de l'escorça continental. La utilitat científica d'aquests sondeigs podria augmentar i el seu cost disminuiria si conjuntament es porten a terme uns estudis geofísics i geològics adequats, tant abans com durant la perforació. Emprant estudis de reflexió sísmica profunda, per exemple, hem après

que freqüentment les nostres concepcions, fetes des de la superfície, de l'estructura interna de la Terra eren força diferents de la realitat.

Una veritat a mitges de la geologia és la doctrina "uniformitarista" que sosté que "el present és la clau del passat". Si això és vàlid tenim un punt de partida per a intentar comprendre els processos que van formar els continents. Per analogia, podem observar els processos que estan tenint lloc en les zones actuals de convergència de les plaques i estudiar els arcs insulars i les serralades joves, que són els productes d'aquestes col·lisions entre les plaques.

En aquestes regions, les roques volcàniques formades per la fusió parcial del material més dens són més similars, quant a la seva composició química, a la mitjana de la Terra que no pas a la dels basalts de les dorsals oceàniques. Aquestes roques volcàniques tenen una densitat més baixa que les que es formen en les dorsals centrals oceàniques i poden contribuir a la major flotabilitat dels continents, cosa que permet la seva supervivència a través del temps geològic. És per això que sembla prou admissible la idea que els arcs insulars (com per exemple les Aleutianes) i les serralades de naturalesa volcànica joves (com poden ésser els Andes) que voregen els continents siguin "fàbriques de continents" on es formen els nous materials surants a partir d'uns processos químics ocasionats en les roques més denses del mantell. És bastant raonable suposar que la font parcialment fosa del material continental és el fragment adjacent de la litosfera oceànica que s'enfonsa. Però la investigació geoquímica dels elements traça i de les composicions isotòpiques de les roques volcàniques contradiu aquesta interpretació tan fàcil. El que mostren aquestes mesures és que la regió on es produeixen les roques continentals no és senzillament el mantell enfonsat, com és característic de l'àrea font dels basalts produïts a les dorsals submarines. Llurs composicions químiques suggereixen la col·lisió de parts del mantell que no encaixen amb els processos que actualment tenen lloc a les dorsals oceàniques. També representen una prova de l'existència d'unes fonts més superficials, com per exemple, l'assimilació de l'escorça continental més antiga per la lava a mesura que puja cap a la superfície, i la contaminació produïda pel reciclatge del material de l'escorça present en els sediments enfonsats. Aquest estudi dels processos físics i químics que tenen lloc en aquestes regions on es produeix la interacció entre els materials oceànics i els continentals representa un repte continu en la frontera de la nostra comprensió de la Terra, i

fig. 4 El diatrama de Mule Ear. En el límit del monument Uplift, a l'altiplà del Colorado, es troba el diatrama de Mule Ear, que és una de les finestres que ens permet veure l'interior de la Terra, a l'oest dels Estats Units. Aquest i orificis d'origen explosiu similars trobats a altres parts del món ens posen en contacte amb roques formades a unes profunditats de diversos cents de quilòmetres, de manera que ens donen oportunitats directes de poder analitzar la naturalesa de l'escorça profunda i fins i tot del mantell superior (fotografia de C. Drake).



durant la propera dècada continuarà essent un tema important de recerca.

Abans de la formulació de la nova tectònica de plaques es donava molta importància al significat de l'escorça continental, d'un gruix aproximat de trenta-cinc quilòmetres, i al seu límit amb el mantell, denominat discontinuïtat de Mohorovicic. Durant els primers anys de la revolució que va produir la tectònica de plaques hi havia una tendència a treure importància als continents, donat que se'ls considerava com una sèrie de peces d'"escòria" superficial relativament primes enganxades a les plaques de la litosfera, que eren les realment importants. Aquest punt de vista, però, està canviant actualment. Encara que al nostre coneixement de la litosfera continental li falta molt per completar, sembla que la distinció entre continent i oceà s'està fent més dràstica del que abans es creia. Aparentment, les plaques de sota de l'escorça continental es desplacen amb un moviment relatiu més lent, i, almenys en alguns llocs, són més gruixudes (200 a 400 km) que llurs corresponents oceàniques. Segons el punt de vista dels geoquímics, hi ha proves que les fonts del mantell continental estan relativament molt menys diferenciades, si les comparem amb el conjunt de la Terra, que les dels basalts de les dorsals oceàniques.

L'INTERIOR DE LA TERRA

El desplaçament horitzontal de les plaques de la litosfera, tant pel que es refereix a les continentals com a les oceàniques, i l'enfonsament de les darreres en llurs límits, són l'expressió més plausible de la màquina calorífica de l'interior del planeta. Lògicament, perquè hi hagi una conservació de la matèria ha d'haver-hi un contraflux més profund, gràcies al qual la matèria torna als centres d'expansió situats en les dorsals. Actualment, però, hom desconeix la naturalesa d'aquest contraflux. D'alguna manera l'expansió del fons oceànic, l'enfonsament dels fragments subduïts i el contracorrent han d'ésser les diferents parts d'un sistema de corrents de convecció. Com als altres sistemes d'aquests tipus, la força motora és la diferència de densitat, i la font d'energia d'aquesta convecció és la calor produïda a l'interior de la Terra. La diferència de surament és un resultat de l'expansió tèrmica ordinària i les diferències de densitat associades als canvis de fase, tant els que es

donen entre sòlid i líquid com els que només inclouen transformacions a l'estat sòlid. No obstant això, resulta molt difícil avançar més enllà d'aquestes generalitzacions. No es coneix pràcticament res d'aquests contracorrents. Com a mínim, alguns d'ells han de sobrepassar profunditats de set-cents quilòmetres, ja que els terratrèmols de focus més profunds mostren que els fragments s'enfonsen pel cap baix fins a aquestes profunditats. Els estudis dinàmics de l'equilibri de la pressió demostren que no es pot reduir l'acció del contracorrent principal a la feble astenosfera que se situa justament a sota de la litosfera. Almenys en la majoria dels casos, aquestes dues capes pertanyen a la mateixa porció més externa del sistema convectiu. Tot i que és prou clar que, en termes generals, el sentit del moviment de les plaques tectòniques de la Terra representa un sistema convectiu, es diferencien en molts aspectes dels sistemes més corrents d'aquests tipus estudiats al laboratori, de les teories clàssiques o dels observats en l'atmosfera. De fet, hom no pot descriure els corrents de convecció com un tipus de moviment regular d'unes cel·les disposades simètricament. El model particular d'expansió que s'ha pogut observar en el fons oceànic no pot ésser més antic que les conques actuals en si, és a dir, uns dos-cents milions d'anys. Aquest és el temps necessari perquè una placa es desplaci deu mil quilòmetres, o sigui, una quarta part de la circumferència del planeta, a una velocitat mitjana de cinc centímetres l'any. Per tant, si es considera aquest moviment una cel·la en convecció, encara no hi ha hagut prou temps per a completar un cicle d'aquest moviment periòdic. A més, encara que el contracorrent arribi fins al mantell inferior, la proporció entre les dimensions horitzontals i verticals de les cel·les terrestres són molt més grans que els fluxos, aproximadament equidimensionals, estudiats al laboratori.

Probablement, algunes de les raons d'aquestes diferències estan relacionades amb les grans variacions de pressions, temperatures i viscositats de les diferents parts del sistema convectiu. La comprensió completa de la dinàmica de la producció de calor dins del nostre planeta ha d'incloure també tot el que s'ha esbrinat durant els últims trenta anys referent a la química i la mineralogia de l'interior de la Terra.

Els sismòlegs saben des de fa molt temps que la constitució interna del globus terrestre no es pot explicar només en termes d'un nucli i d'un mantell homogeni format per silicats. En la major part del mantell situat a unes profunditats entre 400 i 1.000 km resultava impossible

explicar les velocitats de les ones elàstiques solament com una conseqüència de la comprensió d'un material homogeni, tant químicament com mineralògicament. Tot i tenir una gran tolerància amb els efectes de la pressió i la temperatura, hom va descobrir un augment anòmal de la velocitat de propagació de les ones, i consegüentment de la densitat del medi que travessaven. Es va plantejar la hipòtesi que aquests efectes eren produïts per les transformacions a l'estat sòlid, a través de les quals els silicats més abundants a l'escorça es transformen en minerals densos, i per tant més estables termodinàmicament, sota les pressions de cents de mils d'atmosferes típiques d'aquestes profunditats. Gran quantitat d'investigacions teòriques i de laboratori han servit per a identificar la naturalesa mineralògica més probable d'aquests canvis de fase, així com llur relació amb les "discontinuitats" de les densitats i les velocitats identificades mitjançant la sismologia. A les zones relativament poc profundes del mantell, aquests minerals són constituïts per unes estructures més compactes que les que es donen correntment en els minerals més superficials, formades per tetraedres de SiO_4 i AlO_4 i neutralitzades per cations de magnesi, ferro, sodi i calci que els envolten. A pressions més altes, s'aconsegueixen densitats més grans, i els minerals ja perden aquestes estructures tetraèdriques, donat que els silicats s'agrupen en estructures més compactes en les quals hi ha sis anions d'oxigen envoltant el silici.

Hom no entén gaire bé encara la relació que existeix entre aquests resultats que ens facilita la mineralogia d'alta pressió i els moviments de convecció la tectònica de plaques. Normalment, sempre s'han formulat els canvis mineralògics en termes d'un mantell compost per capes relativament estàtiques, mentre que el model de les plaques tectòniques requereix la concepció d'un mantell irregular i dinàmic. Tot això s'ha de combinar per a formar l'única realitat, que és la de la Terra actual, en la qual els canvis de fase són tant causes com conseqüències de les característiques tèrmiques que acompanyen els corrents de convecció.

LA HISTÒRIA DE LA TERRA

Obviament, encara hi ha molt per aprendre abans que puguem tenir una descripció detallada de l'interior de la Terra. A més, la des-

cripció del nostre planeta tal com és ara no és més que una part de la tasca assumida pels científics de la Terra. També fa falta comprendre l'origen i la història de la Terra, és a dir, quines són les diferències i les similituds existents entre les condicions químiques, físiques i dinàmiques del passat i del present. Així mateix, és fins i tot necessari projectar el coneixement de l'estat del nostre planeta cap al futur per a poder afrontar d'una manera intel·ligent els problemes del medi ambient de la humanitat, com per exemple els canvis climatològics, els terratrèmols i les variacions del nivell del mar.

Durant diversos segles de treball molt dur, els geòlegs van confeccionar mapes que mostren la distribució de les formacions rocalloses de la superfície de la Terra. El desenvolupament d'una escala estratigràfica del temps, la qual es basa en organismes ja extingits que s'han conservat com fòssils en les roques sedimentàries, va permetre realitzar una correlació mundial dels esdeveniments de la història geològica fins uns sis-cents milions d'anys enrera. Modernament, hom ha aplicat mètodes de datació que utilitzen isòtops radioactius naturals de l'urani, el tori, el rubidi, el potassi i el samari, el que ens ha permès ampliar aquesta escala pràcticament fins als 4.500 milions d'anys d'història que té la Terra. Abans que es demostrés la teoria de la tectònica de plaques aquests mètodes de datació permetien delimitar el traçat dels antics sistemes de muntanyes, la localització de les regions volcàniques i esbrinar quines regions dels continents eren mòbils i quines estables en el passat. Malgrat tot això, mancava una base teòrica eficaç. Per exemple, quan es va traçar tot el cinturó de muntanyes de 1.100 milions d'anys d'antiguitat que s'estenia des del Canadà fins a Texas, travessant tota la part est dels Estats Units, no hi havia cap altra base sinó una ingènua extrapolació per creure que s'acabava allà i no que continuava encara cap al sud-oest. Actualment, tenim l'esperança que la nova comprensió que tenim dels processos dinàmics globals aportí la solució de problemes com aquest. Però s'avança a poc a poc. Les manifestacions més clares d'aquests processos dinàmics es troben en les conques marines, però precisament les més antigues han estat gairebé consumides del tot per aquests mateixos processos dinàmics. Molt poques vegades es poden identificar els fragments pertanyents a l'antiga escorça oceànica amb una certa precisió. Són més corrents les proves de col·lisions entre els continents i d'esquerdament d'aquests, però tot i així, la interpretació sempre presenta molta

discussió. Tampoc no sabem fins a quin punt és correcte extrapolar els processos tectònics que tenen lloc avui dia amb aquells que devien ocórrer als primers temps geològics. Certament, les lleis físico-químiques fonamentals que regeixen la convecció i l'estabilitat mineral sempre han estat vàlides. No obstant això, fins que no compreguem exactament com i per què aquestes lleis estan relacionades amb les dimensions, el nombre, el gruix i la velocitat de les plaques actuals, no podrem estar segurs de la similitud entre aquestes plaques i les existents en el passat. Fa molt de temps la Terra devia ésser molt diferent. En el moment de la seva formació, la producció de calor per radioactivitat era aproximadament tres vegades més gran que l'actual. La desintegració dels elements radioactius i la pèrdua de temperatura en la superfície segurament han provocat una considerable evolució tèrmica. Probablement, la diferenciació de l'escorça, la composició de l'atmosfera i el volum dels oceans i dels continents han canviat amb el temps, però quantificar tot aquest procés és encara tot un desafiament.

LA LLUNA, ELS PLANETES I L'ORIGEN DE LA TERRA

S'està posant molta atenció en els problemes que presenta l'extrapolació de les observacions del present amb el temps passat. S'està avançant molt cap a llur solució i encara s'espera progressar més. ¿Però s'aconseguirà algun dia deduir les condicions i la història del planeta fins al mateix moment del seu inici, a partir de les observacions geològiques, geofísiques i geoquímiques?

Hom pot justificar fàcilment el pessimisme que sorgeix en el moment de contestar aquesta pregunta. Afortunadament, és possible que la resposta no depengui completament d'aquest tipus d'extrapolació. Podem esperar alguna mena d'ajuda que vingui de la direcció oposada, a causa que vivim en una "edat d'or" de l'exploració espacial. En la dècada passada, l'estudi del sistema solar, fins al planeta Saturn, va deixar d'ésser una branca de l'observació astronòmica per convertir-se en una matèria pròpia de la fotogeologia. Entre altres coses, aquests estudis planetaris aporten moltes possibilitats de definir finalment quines són les condicions

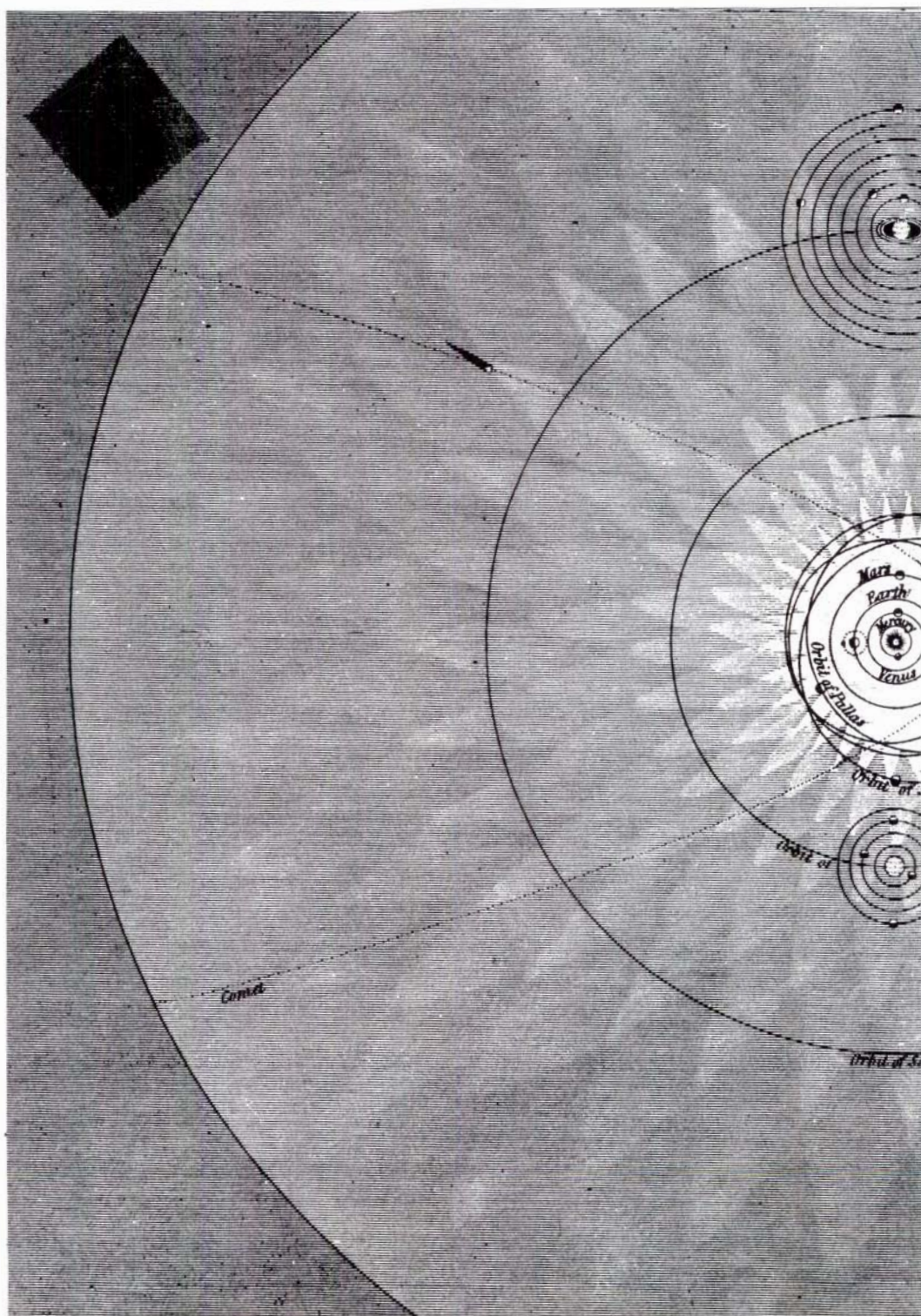
inicials probables en la història de la Terra i dels altres planetes i quines altres no ho són. Hi ha relativament poques roques que hagin durat més de 2.800 milions d'anys a la Terra, i les més antigues que hom coneix, descobertes a Groenlàndia, tenen més o menys 3.800 milions d'anys. Hi ha altres roques similars però quelcom més joves que hom ha trobat en regions aïllades de la Terra. Com és que no trobem roques més antigues? Abans que hom pogués fer una exploració lunar i espacial, era impossible donar una bona resposta a una pregunta d'aquest tipus. Semblava una explicació coherent que la Terra s'hagués format a una temperatura molt baixa, i que les roques més velles que s'han descobert no eren més que restes dels primers moments de l'activitat magmàtica i de la sedimentació, les quals podien haver tingut lloc cents de milions d'anys després de la formació de la Terra. Una altra alternativa podria ésser que la Terra s'hagués fos completament en el moment de la seva formació i que s'hagués mantingut massa calenta per a conservar alguna prova d'èpoques més pretèrites que la de les roques més antigues que tenim. També, és clar, es poden imaginar altres solucions.

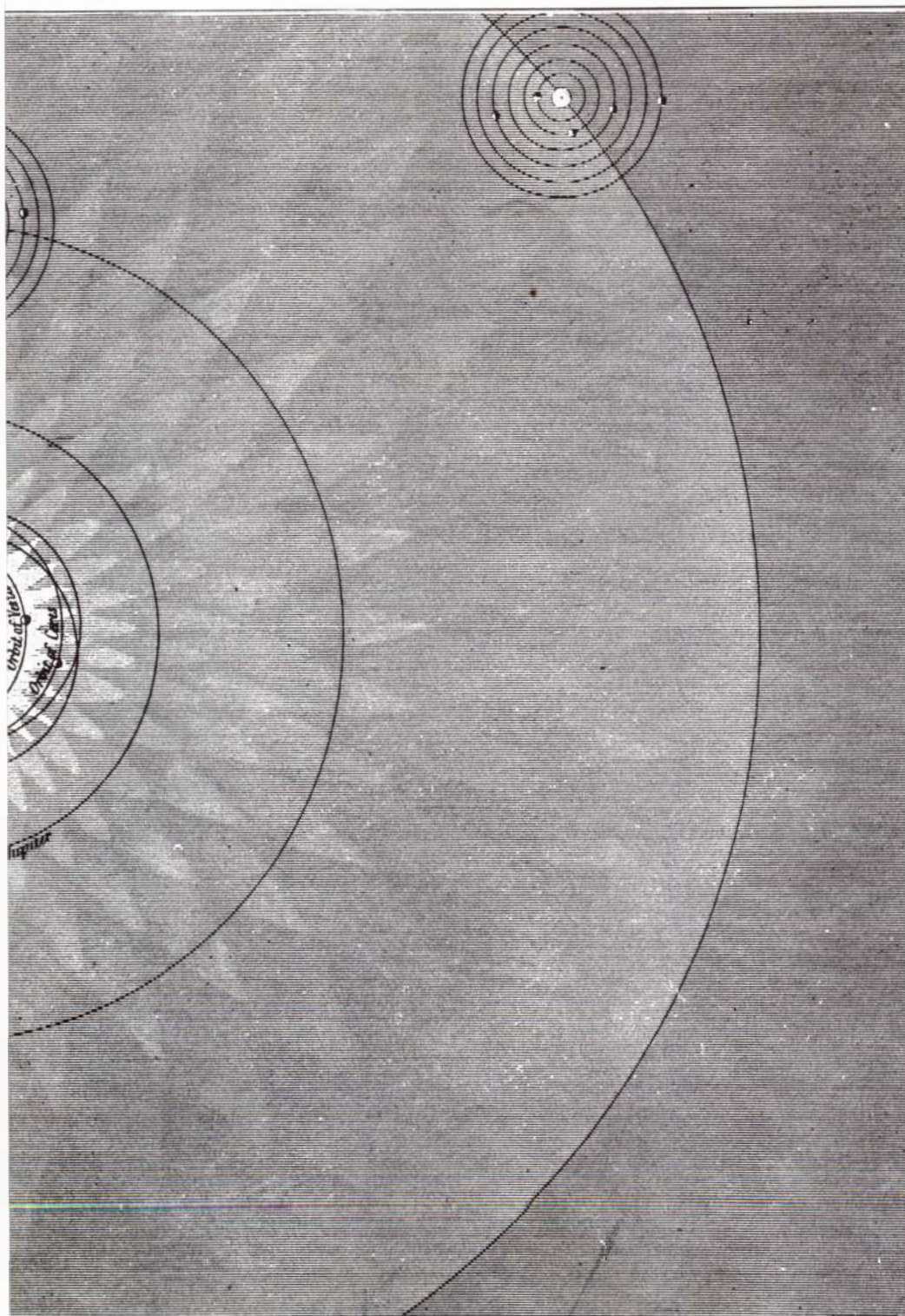
Les roques lunars portades pels projectes Apollo i Lluna han donat la prova més evident de l'existència d'activitat ígnia del planeta durant els primers set-cents milions d'anys de la història del nostre sistema solar. A diferència del que passa a la Terra, les roques volcàniques d'una edat que oscil·la entre els 3.300 i els 3.800 milions d'anys són molt abundants en els mars de la cara fosca de la Lluna. Fins i tot hi ha roques i fragments d'aquestes més velles, d'uns 3.900 - 4.000 milions d'anys, que dominen en les regions més elevades de la cara il·luminada. Hom també pot trobar trossos de roques datades en uns 4.200 milions d'anys que mostren processos d'escalfament i fusió generalitzats. S'han localitzat alguns fragments de roques que possiblement s'acosten a l'edat de la Terra o de la Lluna. La interpretació que hom hi dona és que demostren que la Lluna va travessar una fase de diferenciació magmàtica de gran amplitud i profunditat fa aproximadament 4.400 o 4.500 milions d'anys. Encara que hi ha molta controvèrsia respecte als detalls d'aquests fets, és important saber que fins i tot un planeta tan petit com la Lluna ha pogut assolir unes temperatures extremament altes en un període molt primitiu. Aquesta conclusió està subratllada per la datació que han donat uns meteorits basàltics d'uns 4.500 milions d'anys, que se suposa que provenen d'un planeta asteroïdal encara més petit. Encara que és

possible formular moltes teories sobre la formació de la Lluna i dels planetes, una característica comuna a gairebé totes les possibilitats és la conclusió que si la Lluna va estar molt calenta a l'inici de la seva formació, la Terra ha d'haver-ho estat encara més. En els primers temps del nostre planeta, les activitats més comunes han d'haver estat el volcanisme i la projecció de composts volàtils, principalment vapor d'aigua i diòxid de carboni.

L'exploració espacial també ens està aportant altres tipus d'informació molt important sobre els estats inicials dels planetes i del començament del sistema solar, però encara no som prou intel·ligents per a comprendre el que volen dir aquestes coses. Per exemple, la primera càpsula espacial que va estudiar Venus demostrà que la seva atmosfera és constituïda fonamentalment per diòxid de carboni, amb una gran massa total. Això produeix pressions atmosfèriques en la seva superfície de l'ordre de cent vegades la nostra. Aquesta atmosfera de diòxid de carboni produeix un "efecte hivernacle", amb la qual cosa és relativament transparent a la radiació solar d'ona curta, però opaca a la radiació infraroja, més llarga, que és reenviada a l'espai exterior. El balanç de la radiació incident respecte a la reflectida és més gran que el de la Terra i això provoca una temperatura permanent de la superfície d'uns 450°C, molt més alta que els 20°C de la Terra. Si el nostre planeta tingués aquesta temperatura tan elevada, la seva atmosfera seria també molt més densa, i seria constituïda bàsicament per aigua i diòxid de carboni produït per les roques carbonatades. A més, l'absorció de la radiació infraroja provocaria un efecte d'hivernacle similar que mantindria l'alta temperatura.

Sembla lògic, doncs, que els planetes de grandàries i composicions semblants a la Terra i Venus puguin existir tant en una forma com en l'altra. En un dels casos, les seves temperatures superficials i les seves pressions atmosfèriques podrien ésser baixes, com les del nostre planeta, i la majoria dels gasos volàtils tindrien la seva forma líquida o sòlida. Tanmateix, si hi hagués hagut unes condicions inicials una mica diferents, que provoquessin una temperatura més alta en la superfície, s'hauria evaporat una bona quantitat de material volàtil, i l'efecte d'hivernacle hauria escalfat la superfície encara més, provocant una evaporació encara més gran i una evolució ràpida cap a l'estat de l'atmosfera venusiana. Per tant, hom pot pensar que no hi ha una diferència fonamental entre l'atmosfera de la Terra i la de Venus. La manca d'aigua a Venus pot ésser atribuïda a una més gran per-





dua d'hidrogen en trencar-se les molècules de l'aigua per la radiació solar ultraviolada, resultat de la diferent estructura tèrmica de l'atmosfera d'aquest planeta.

Tot i així, els darrers mesuraments de l'atmosfera de Venus, realitzats per les sondes Venera i Pioneer, revelen una diferència més fonamental i sorprenent entre les atmosferes d'aquests dos planetes de mida similar. Venus té unes cent vegades més gasos nobles, completament volàtils, que la Terra, amb l'excepció de l'heli, que es perd molt fàcilment en l'espai. L'única raó per la qual l'argó és un constituent moderadament abundant en l'atmosfera de la Terra és que un dels isòtops d'aquest element (^{40}Ar) es forma per la desintegració radioactiva d'un isòtop del potassi. En canvi, si aquests mesuraments són correctes, Venus té una quantitat d'argó ordinari, no derivat del potassi, molt més gran, així com de neó i potser de criptó i xenó. És impossible que l'efecte d'hivernacle provoqui aquesta diferència perquè, contràriament al que passa amb l'aigua i el diòxid de carboni, aquests gasos nobles no es poden condensar a la temperatura de la superfície terrestre. És gairebé segur que aquests gasos nobles han estat presents a Venus des del moment de la seva formació, però les teories actuals sobre la formació dels planetes són incapaces de donar una explicació clara de per què Venus rebé aquests gasos i la Terra no. Hom ha plantejat diverses solucions, però totes semblen una mica gratuïtes. Això no obstant, si resulta que aquestes són les úniques explicacions possibles, les noves observacions limitarien molt les possibilitats de formació dels planetes.

La història dels elements volàtils de Mart també és una mena de trencaclosques. La pressió atmosfèrica total d'aquest planeta és molt baixa, menys d'un 1 per cent de la de la Terra. Igual com Venus, és constituïda principalment per diòxid de carboni, amb algunes traces de vapor d'aigua. En canvi, les fotografies de la superfície marciana fetes per les càpsules Mariner i Viking mostren unes erosions semblants a les causades per corrents d'aigua, probablement produïdes en sobtades inundacions catastròfiques. La pressió i la temperatura actuals de l'atmosfera de Mart són massa baixes perquè hi hagi aigua líquida en la superfície, mentre que és probable que estigui tota condensada en forma de gel en els casquets polars i en el sòl permanentment congelat. ¿És possible que Mart hagi estat prou calent per a produir una atmosfera amb pressió i humitat més altes, i amb aigua corrent per la seva superfície? Les observacions dels canvis de l'òrbita de Mart, així

fig. 5 Crater meteorític a Arizona. La majoria dels planetes terrestres i també la Lluna presenten superfícies amb gran quantitat de cràters que són conseqüència de l'intens bombardeig d'objectes extraplanetaris que han sofert, que ha anat disminuint fortament en intensitat des de fa uns 3.900 milions d'anys. A la Terra s'han pogut reconèixer molts cràters fòssils en roques de fa més de 2.000 milions d'anys. Un dels més recents d'aquests cràters és el d'Arizona. La manca relativa de cràters a la Terra, comparada amb la Lluna, és una conseqüència de la seva naturalesa dinàmica. Tot i que és difícil pensar que la Terra es lliurés d'aquest bombardeig, les restes deuen haver quedat destruïdes per l'erosió i l'activitat tectònica posteriors. Per tant, a diferència dels altres planetes, els accidents superficials que presenta la Terra són relativament joves, geològicament parlant (fotografia de D. Rudds, U.S. Geological Survey, Flagstaff, Arizona).



com de l'orientació del seu eix de rotació, suggereixen que la temperatura superficial del planeta pot variar considerablement en una escala de temps de milions d'anys. De tota manera, és molt difícil de comprendre quantitativament si aquest efecte va poder ésser prou important per a permetre que l'aigua produís els fenòmens d'erosió observats. Potser l'erosió hagi estat produïda per una lava de viscositat tan baixa que podria tenir el mateix efecte que l'aigua corrent. O també és possible que necessitem alguna nova dada per a poder resoldre aquest misteri.

L'atmosfera de Mart conté una quantitat molt petita d'argó produït per la desintegració radioactiva del potassi. Tot i que pot ésser que aquest planeta contingui menys potassi que la Terra, no hi ha cap raó de pes per a creure que això sigui cert. De fet, el raonament convencional ens diria que, com que és més lluny del Sol, Mart hauria de tenir una proporció més alta de potassi, element relativament volàtil, la proporció del qual a la Terra és deu vegades inferior a la seva concentració mitjana en el sistema solar. Una explicació més versemblant és que la majoria d'aquest argó encara es troba a l'interior de Mart i que la màquina calorífica d'aquest planeta treballa més lentament que la de la Terra, segurament a causa d'una temperatura de formació més baixa.

Una altra troballa molt important de la nostra era d'exploració espacial és que les roques lunars més antigues mai no es presenten en forma de grans trossos de lava solidificada, com en els basalts d'algunes regions de la cara fosca, sinó que sempre es troben en forma de fragments en bretxes complexes. El seu comportament isotòpic i aparença indiquen que són els productes finals d'un intens bombardeig de cossos extralunars responsables de la gran quantitat de cràters dels altiplans del nostre satèl·lit. Les dades radioactives mostren que aquest bombardeig va cessar bruscament fa uns 3.900 milions d'anys. Les superfícies dels mars posteriors a aquesta data tenen relativament pocs cràters i les roques no presenten el metamorfisme típic dels impactes a alta velocitat.

No és impossible que la Terra hagi tingut una història similar de formació de cràters. Així, doncs, els estudis lunars mostren que l'absència de les roques més antigues a la Terra pot respondre a dues causes: una activitat magmàtica i geològica d'origen intern molt intensa, combinada amb el metamorfisme de totes les superfícies inicials produït per impactes externs. Els estudis de dinàmica ens senyalen que si els cossos causants dels impactes estaven en

òrbites heliocèntriques en comptes de geocèntriques, tots els planetes del nostre sistema solar van travessar una època similar de bombardeig. En efecte, la característica més sobresortint de les fotografies de Mercuri i de Mart obtingudes per les càpsules espacials és la quantitat de cràters produïts per aquest antic bombardeig. El fet que aquesta sèrie d'impactes disminuís dràsticament fa 3.900 milions d'anys pot constituir una línia divisòria en la història del nostre sistema solar, que separaria uns esdeveniments anteriors d'altres posteriors.

Aquestes mateixes fotografies i els estudis de radar fets a Venus mostren que tots aquests planetes tenen volcans, i per tant una calor interna. La magnitud d'aquesta activitat volcànica, però, varia segons els planetes. Ens farà falta treballar molt encara per a comprendre com operen aquestes altres "màquines" de calor, i fins a quin punt les diferències són una conseqüència de les masses dels planetes, de llurs composicions químiques, de la distància al Sol i de les condicions en el moment de llur formació. Obviament, el nostre model de tectònica de plaques no és l'única possibilitat. Ni la Lluna, ni Mart ni Mercuri no aporten cap prova de tenir un model similar de moviment de plaques.

Les primeres dades de radar obtingudes mitjançant el Pioneer Venus suggereixen que no hi ha moviments de plaques en aquest planeta. Pot ésser que en els grans satèl·lits Galileo de Júpiter existeixin uns estils tectònics completament diferents, segons la informació rebuda pels dos Voyager. El que és molt espectacular és l'activitat volcànica extremament violenta i de naturalesa sulfúrica del satèl·lit interior Io, produïda per les marees d'energia que li comunica el planeta gegant que té per veí.

La recerca que actualment s'està duent a terme amb els meteorits ens proporciona unes explicacions molt importants dels primers temps de la història del sistema solar (fig. 5). Tenen una particular importància els objectes no equilibrats, com per exemple el meteorit Allende, així com les condrites carbonoses, que conserven la informació de l'heterogeneïtat present al principi de la constitució del sistema solar, i que fins i tot poden aportar algunes dades de la història pre-solar.

Fins fa poc, la majoria dels geòlegs no donaven gaire importància a les elucubracions que existien sobre la formació de la Terra i el nostre sistema solar; això va permetre que els científics de mentalitats teòriques poguessin especular lliurement, fins i tot de manera irresponsable. Avui dia la unitat i la interdependència de les

ciències que estudien la Terra i els altres planetes, així com l'astronomia estel·lar i galàctica, són reconegudes per tothom. Probablement el repte més gran de la propera dècada sigui aplegar en una síntesi aquestes ciències, tot mantenint al mateix temps la rigorosa disciplina professional de cada una d'elles, que representa el llegat de moltes generacions.

Lectures addicionals

1. Geophysics Study Committee: *Continental Tectonics* (Geophysics Research Board, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington D.C., 1980)
2. U.S. National Committee on Geochemistry: *Orientations in Geochemistry* (National Research Council, National Academy of Sciences, Washington D.C., 1973)
3. U.S. Geodynamics Committee: *Geodynamics in the 1980's* (Geophysics Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., 1980).
4. R.K. Bambach, C.R. Scotese, A.M. Ziegler: *Before Pangea: The Geographies of the paleozoic world*, "Am. Sci." núm. 68, 26 (gener-febrer 1980).
5. J.G. Sclater i C. Tapscott: *The history of the Atlantic*, "Sci. Am." núm. 240, 156 (juny 1979).
6. T.H. Jordan: *The deep structure of continents*, *ibid.*, núm. 240, 92 (gener 1979).
7. B. Marsch: *Island arc volcanism*, "Am. Sci.", núm. 67 (març-abril 1979)
8. D.L. Peck, T.L. Wright, R.W. Decker: *The lava lakes of Kilanea*, "Sci. Am.", núm. 241, 114 (octubre 1979).
9. C.G. Chase, E.M. Herron, W.R. Normak: *Plate tectonics: Commotion in the ocean and continental consequences*, "Annu. Rev. Earth Planet Sci.", núm. 3, 271 (1975).
10. K. Burke: *The Aulacogens and continental breakup*, *ibid.*, núm. 5, 371 (1977).
11. E. Bullard: *The emergence of plate tectonics: a personal view*, *ibid.*, núm. 3, 1 (1975).
12. *The Future of Scientific Ocean Drilling*, informe d'un subcomitè *ad hoc* de la JOIDES (Joint Oceanographic Institutions for Deep Earth Sampling), Executive Committee, Seattle, Washington, 1977).
13. U.S. Geodynamics Committee: *Continental Scientific Drilling Program* (Geophysics Research Board, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington D.C., 1979)
14. Panel on Continental Margins: *Continental Margins* (Ocean Sciences Board, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington D.C., 1979).
15. *U.S. National Report to IUGG*, "Rev. Geophys. Space Phys.", núm. 17, 1979.
16. U.S. Geodynamics Committee: *U.S. Program for the Geodynamics Project: Scope and Objectives* (Geophysics Research Board, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington D.C., 1973).
17. W.K. Hartmann: *Astronomy: The Cosmic Journey* (Wadsworth, Belmont, Calif., 1978).