

La Tierra, paradigma de la naturaleza

La aproximación al medio planetario en la historia reciente

Resumen

En la segunda parte de este estudio se pasa revista a las controversias geológicas que se desarrollaron a lo largo de los siglos XIX y XX. Marcando dicotomías temáticas extremadamente expresivas –y referentes casi siempre a la naturaleza de la Naturaleza, que diríamos parafraseando a Edgar Morin–, la imagen científica de nuestro planeta centró, en ese período, apasionados debates sobre cuestiones como ¿basta con conocer el presente para saber lo que sucedió en el pasado? ¿Se da un enfriamiento planetario continuado, o sobre la Tierra todo es cíclico? ¿Es la Tierra un objeto rígido, «una gran bola de piedra», o su movilidad superficial e interna revela un energetismo fundamental? ¿Es un simple agregado de materia o un todo orgánico unificado?

El paradigma global de la tectónica de placas ha conducido a superar estos históricos dicotomismos, abriendo por primera vez la posibilidad de una ciencia rigurosa de la Tierra-sistema. En la tercera y última parte se completará este punto de vista y se expondrán algunas de sus consecuencias plausibles.

José Luis San Miguel de Pablos
Universidad CEU San Pablo

1. Controversias geológicas decimonónicas

1.1. Uniformitarismo *versus* catastrofismo

En la primera mitad del siglo XIX, el neptunismo fue decayendo hasta desaparecer, al mostrarse incapaz de hacer frente a las concluyentes pruebas de que el interior del globo se encuentra a alta temperatura, así como a la lógica consecuencia de que dicho calor algo tendrá que ver con la formación de las montañas y de determinadas rocas. Aparentemente las doctrinas huttonianas no deberían haber encontrado mayores obstáculos a partir de entonces, pero el modelo organicista de Hutton no

era aceptado en modo alguno por la cultura mecanicista que enseguida volvió a imperar, y quizá por ello se produjo un nuevo desplazamiento del foco de atención de los geólogos: la polémica científica que sustituyó a la anterior tenía que ver no tanto con la naturaleza de los procesos como con *su similitud o disimilitud con los fenómenos que se producen actualmente*. Se trata del debate que enfrentó a los catastrofistas con los uniformitaristas encabezados por Charles Lyell (1797-1875), importante figura de la historia de la geología. Lyell no propuso ningún modelo nuevo capaz de dar cuenta de las realidades geológicas en su conjunto, sino que se limitó a defender un criterio metodológico: el *uniformitarismo*, del que ya se ha hablado. Hoy en día se considera el uniformitarismo (o actualismo) como un *principio regulador* que ha guiado largo tiempo la investigación geológica, evitándole caer en especulaciones excesivas y mejorando su heurística; pero en ningún caso como un *principio básico* de la naturaleza, como Lyell llegó a considerarlo.

Por el lado contrario, las posturas llamadas catastrofistas eran variopintas. Cubrían un amplio abanico que iba desde los últimos neptunistas hasta Élie de Beaumont, geólogo galo al que se debe la primera formulación precisa de la *hipótesis direccionalista del devenir terrestre*. Tenían todas en común la insistencia en que grandes convulsiones de algún tipo, ocurridas en diferentes momentos del pasado e inobservables actualmente, son las causas fundamentales de los macro-accidentes que configuran el globo terráqueo (distribución mares-continentes, cadenas de montañas, etc.). Los catastrofistas han sido satanizados durante largo tiempo por los geólogos de la corriente actualista dominante,¹ que les han acusado de oscurantismo, viendo en ellos los herederos del integrista diluvianista. A estas alturas está bastante claro que la generalización abusiva de esta acusación tenía algo de táctica tendente a dificultar un debate sereno sobre la inclinación a hacer del uniformitarismo un dogma, no sólo metodológico sino también ontológico.

Vale la pena, llegados a este punto, dedicar un cierto espacio a la concepción direccionalista de los procesos geológicos. Que la Tierra irradiaba una cantidad apreciable de calor ya se admitía a principios del siglo XIX. No sólo están los volcanes, fumarolas y géiseres, sino también el

¹ Especialmente en el mundo anglosajón y también en España.

gradiente geotérmico, el conocido dato de que la temperatura aumenta 1 °C por cada 30 m de descenso. De hecho, esta era una de las grandes bazas del plutonismo. Sin embargo, este dato no favorecía las tesis lyellianas, y vamos a ver por qué.

Si, como pensaba el matemático y físico Fourier –entre otros muchos que, como él, seguían la pista marcada por Descartes, Leibniz y Buffon–, el calor interno de la Tierra no es otro que *un resto del que hizo posible la formación del globo*, entonces tal calor debe ser finito y está llamado a disiparse por completo.² De ello, un simple proceso de deducción lógica conduce a suponer que: 1) la formación de las montañas debe tener por causa la contracción de la Tierra originada por su enfriamiento; 2) el flujo geotérmico en los primeros tiempos de la historia del planeta, cuando estaba muy caliente, tuvo que ser mayor que en la actualidad, de modo que los fenómenos volcánicos, sísmicos, etc., serían entonces mucho más intensos que hoy en día, en contradicción con la doctrina actualista extrema; 3) los ciclos geológicos tienen que hallarse limitados en el tiempo, hacia el pasado por el tope de edad que su origen mismo le impone al globo, y hacia el futuro por el enfriamiento progresivo, que coloca a la Tierra frente a la perspectiva de una inexorable muerte térmica tras un período indeterminado de «agonía geológica» en el que los fenómenos telúricos se darán de forma cada vez más atenuada.

Observemos que el direccionalismo geológico es una tradición científica que recoge los ecos de una tradición cultural mucho más vasta: el historicismo unidireccional.

Planteadas por Élie de Beaumont la hipótesis de que la contracción terrestre suministra una explicación suficiente de las orogenias,³ la amplia aceptación que enseguida logró impidió que el actualismo lyelliano gozara de universal consenso. De modo que durante gran parte del siglo XIX estas dos corrientes geológicas, la uniformitarista y la direccionalista, coexistieron y se mantuvieron enfrentadas.

Ejemplarizando la célebre frase de Thomas Kuhn, Lyell y de Beaumont (igual que antes Werner y Hutton) «vivían en mundos diferentes». Por descontado que su planeta era el mismo, la Tierra, a cuyo conoci-

² FOURIER, J., en *Annales de chimie et de physique*, vol. XXVII, 136, 1824, París.

³ ÉLIE DE BEAUMONT, L., *Notices sur les systèmes de montagnes*, P. Bertrand, París, 1852.

José Luis San Miguel de Pablos

miento dedicaban ambos sus mayores esfuerzos, pero eran incapaces de verlo de la misma manera. *Sus distintas lentes paradigmáticas les hacían ver Tierras distintas*. Y cada uno de ellos parecía incapaz de ver la Tierra que veía el otro.

1.2. La evolución de la imagen del interior de la Tierra

El inaccesible interior del globo fue otro de los caballos de batalla de la geología durante el siglo XIX. Necesariamente ligadas a inobservables hipótesis relativas a la génesis planetaria, como la celeberrima emitida por Kant en 1755, las teorizaciones sobre el interior de la Tierra no eran del gusto de Lyell, a quien molestaba la idea de que nuestro planeta pudiera tener una parte interna en estado de fusión, herencia de una Tierra primitiva muy diferente de la actual:

Se asumió que, en los tiempos de su creación, la Tierra se hallaba en un estado fluido y al rojo vivo, y que desde entonces siempre ha estado enfriándose, sufriendo una lógica contracción en sus dimensiones, y adquiriendo una corteza sólida. Se trata de una hipótesis arbitraria, pero bien calculada para no perder popularidad, porque al llevar el pensamiento al comienzo de todas las cosas, ya no se requiere el apoyo de las observaciones ni de hipótesis ulteriores⁴.

Entre los geólogos continentales, la imagen de una Tierra que cuenta con un interior fundido a partir de una profundidad no muy grande ganó rápidamente terreno tras derrumbarse el modelo neptunista. Lo decisivo fueron las ya mencionadas mediciones del incremento de la temperatura con la profundidad, recopiladas sistemáticamente por Cordier, a quien se debe el primer modelo de una Tierra con el interior en estado de fusión. Este modelo resulta de observar que, de acuerdo a una gráfica de incremento constante de la temperatura –condición asumida por Cordier–, las rocas deben convertirse en magma a unos 50 km de profundidad⁵.

⁴ LYELL, C., *Principles of Geology*, I.

⁵ Ver DEPARIS y LEGROS, *Voyage à l'intérieur de la Terre*.

La hipótesis fusionalista posee un gran poder explicativo. Da cuenta directamente de los volcanes y de las intrusiones magmáticas, y además puede servir para entender otros muchos fenómenos, como las orogéneas, el metamorfismo y los terremotos. Curiosamente, implicó en su momento la adopción por los geólogos continentales de la concepción de Hutton de un calor interno que opera también en la actualidad, justo cuando el continuador de la escuela huttoniana en lo concerniente al modelo cíclico-estacionario, Lyell, la rechazaba en Gran Bretaña por sus consecuencias contrarias al uniformitarismo.

1.3. Una controversia histórica: geología versus geofísica

En general, fueron los físicos interesados en el comportamiento del globo, los primeros geofísicos, los que más criticaron el modelo fusional. El primero de ellos en definirse fue Hopkins quien, hacia mediados de siglo, centró sus objeciones en la enorme presión a que están sometidos los materiales en profundidad, un factor que hace subir su punto de fusión. Concluyó que la corteza sólida no puede tener menos de 1.300 km de espesor, y que la Tierra, en consecuencia, o es completamente sólida o cuenta sólo con una zona fundida por debajo de la corteza, recubriendo un núcleo sólido⁶.

Los pioneros de la geofísica fueron adoptando crecientemente posiciones que cabe calificar de «ultradireccionalistas», influenciados por las investigaciones y teorías de William Thomson (1824-1907), que ha pasado a la historia como lord Kelvin. Este científico llevó hasta sus últimas consecuencias la idea de que los cuerpos del sistema solar están más o menos calientes en la medida en que todavía conservan parte del calor que adquirieron al formarse por la implosión gravitacional de la nebulosa de Kant-Laplace, y la aplicó no sólo a la Tierra (*calor interno*) sino también al Sol, fuente exterior de energía esencial para el mantenimiento de la vida terrestre. Calculando la temperatura que debía tener nuestra estrella en el momento de su formación (supuesto un proceso regido únicamente por la condensación gravitacional de la nube primigenia), y comparándola con la que tiene actualmente, llegó a la conclusión de

⁶ *Ibid.* La conclusión de Hopkins se ha revelado correcta.

que la edad del Sol se hallaba comprendida entre 20 y 400 millones de años, con 100 millones de años como cifra más probable. Sin embargo, ulteriores cálculos le condujeron a corregir esa edad a la baja, fijando su tope máximo en lo que antes había considerado como el mínimo admisible: de 20 a 25 millones de años⁷. Ni que decir tiene que estas cifras no cuadran ni con lo que hoy día se sabe (que el sistema solar tiene alrededor de 4.600 millones de años) ni con lo que los geólogos estimaban ya en la época (una edad aproximada de la Tierra del orden de 1.000 millones de años). La causa del error de Kelvin es conocida: las energías geotérmica y solar no tienen sólo carácter residual, sino que los *procesos radiactivos*, que Kelvin desconocía, juegan un papel importante en su generación.

Llegados a este punto, conviene llamar la atención sobre el hecho de que los dos sectores científicos enfrentados hace algo más de un siglo, daban ambos por sentado que nuestro planeta experimenta un proceso de degradación térmica, si bien mucho más rápido para los direccionalistas que para sus oponentes uniformitaristas. Se estaba tan lejos entonces del geo-organicismo de Hutton que los uniformitaristas mismos, defensores de un estado cuasi-estacionario en el que la Tierra se mantendría desde su formación, se abstendían de evocar nada parecido para apoyar su opción, y preferían insistir en ella de manera apriorística, puestos a la defensiva frente a los geofísicos, que aparecían a los ojos de todos como los depositarios de la verdad científica última. En semejante tesitura, el actualismo estricto empezó a mostrar contradicciones. Es así que encontró, de manera paradójica, su mayor apoyo en la teoría más opuesta al uniformitarismo que imaginarse pueda: el evolucionismo biológico de Darwin. Y ello porque la evolución de las especies por selección natural exigía contar con períodos de tiempo inmensamente largos, que obligaban a mantener la escala cronoestratigráfica de los geólogos. Pero, por otro lado, evidenciaba que la vida había conocido tales transformaciones a lo largo de su historia que resultaba inverosímil que el medio ambiente no hubiese sufrido también cambios sustanciales.

⁷ HALLAM, A., *Grandes controversias geológicas*. Ver también: Deparis y Legros.

1.4. La síntesis de Eduard Suess

El geólogo austriaco Eduard Suess (1831-1914) corresponde el primer intento realmente serio de fijar un modelo global de la dinámica terrestre, de definir una imagen de la Tierra que pudiera resultar aceptable para todo el mundo. Se habla habitualmente de la «síntesis» geológica que este científico llevó a cabo⁸, y seguramente esta expresión refleja bastante bien el carácter de su obra. Suess continúa, en parte, la tradición direccionalista, y propone en su magna obra *La faz de la Tierra* una explicación general de los grandes accidentes superficiales (distribución océanos-continentes, cadenas de montañas, etc.) basada en la contracción paulatina del globo causada por su aparentemente ineluctable pérdida de calor a lo largo del tiempo. Suess no rechazaba los acontecimientos repentinos, las «catástrofes», pero sí defendía el predominio de los procesos graduales, y creía que, en general, los geólogos debían guiarse por el estudio de los fenómenos actuales, observables. *Sintetiza*, pues, con notable eclecticismo, el direccionalismo y el actualismo, las dos corrientes que se habían enfrentado durante décadas. La tarea le venía facilitada por la reciente desaparición de los «sumos pontífices» de ambas escuelas, Lyell y de Beaumont, aunque conviene añadir que mientras que en Francia las ideas sintetizadoras suessianas fueron muy bien acogidas, no ocurrió lo mismo en Inglaterra, donde durante largos años subsistió una escuela lyelliana poco dispuesta a hacer concesiones al direccionalismo.

En realidad, Suess hizo algo más que una síntesis. Tomó, de hecho, partido claramente por una determinada imagen de la Tierra: frente al geoorganicismo de tradición aristotélica y huttoniana, que apostaba por el mantenimiento a muy largo plazo de los parámetros básicos del planeta, dejando aparte pequeñas oscilaciones el geólogo de Viena se definió a favor de una concepción «degradacionista» (denominación que encuentro preferible a *direccionalista*) según la cual los parámetros terrestres fundamentales varían de forma continua y apuntan en una dirección a causa del comportamiento general de la Tierra como un sistema en pérdida de calor y en vías por tanto de degradación entrópica. El primero y principal de tales parámetros no es otro que el propio radio terrestre, que disminuye poco a poco al enfriarse la Tierra. Ahora bien, la contracción

⁸ Ver, p. ej., GOHAU, G., *Une histoire de la Géologie*.

José Luis San Miguel de Pablos

del interior del globo trae como consecuencia el derrumbe, por efecto de la gravedad, de zonas amplias de la corteza, la cual, habiéndose enfriado ya en los primeros tiempos del planeta, tiende a mantener su superficie total mientras las *geosferas* internas reducen su volumen. El resultado será la aparición de arrugas contraccionales sobre la «faz de la Tierra». Las orogenias, complicados procesos de corrugación superficial, estarían causadas por las componentes horizontales de las fuerzas de contracción.

Suess creía que los fondos marinos eran litológicamente idénticos a las áreas continentales. Las observaciones de algunos geólogos en el sentido de que el principio de la *isostasia* (la compensación hidrostática de las distintas densidades de áreas litológicamente heterogéneas, mediante su hundimiento o elevación) implica que los materiales del fondo de los océanos tienen que ser más densos que las rocas de los continentes, fueron desestimadas por él. Esto le permitió defender la *intercambiabilidad entre áreas continentales y oceánicas*, una de las claves de su concepción de la Tierra y su historia.

Como los macro-abombamientos que, para Suess, forman tanto las cuencas marinas como los continentes, podían eventualmente invertir su signo (de resaltes pasar a hundimientos, y viceversa), las situaciones de transición también eran concebibles, e igualmente la existencia en el pasado de macro-ondulaciones muy diferentes de las actuales por su forma y situación. Esto le llevaba a imaginar un mapamundi antiguo totalmente diferente del actual y sin apenas relación con él. Suess defendía que el Atlántico sólo se había formado –por hundimiento– en el Mioceno, hace unos 15 millones de años. Con anterioridad, un «continente de Atlantis» (uno de los *puentes intercontinentales* que su modelo propugnaba) unía el Viejo con el Nuevo Continente. La continuidad en América del Norte –finalmente confirmada, pero de la que hoy se da una explicación completamente distinta– de las cadenas de montañas europeas era contemplada por él como una prueba de su teoría. El predicamento que alcanzó la «síntesis de Suess», tanto durante su vida como tras su desaparición, fue muy grande; se puede, en buena lógica, hablar de un *paradigma suessiano* de la geología, que conoció dos etapas de amplia aceptación, separadas por el efímero interés que despertó la

alternativa revolucionaria de Alfred Wegener. Estos dos períodos van, el primero, desde la publicación de los dos primeros tomos de *La faz de la Tierra*, en 1878 y 1883, hasta la exposición de la hipótesis de la *deriva continental* por el germano, en enero de 1912; y el segundo, desde el descrédito en que cayó esta última concepción a partir de 1925-1930, hasta la «conversión» de los científicos de la Tierra al moviismo, en los años 60 del siglo pasado.

De todas maneras, en los Estados Unidos la receptividad inicial a las propuestas de Suess fue menor que en Europa, debido a la existencia de una escuela americana que partía de presupuestos muy distintos, centrada en las teorías de James Dana (1813-1895). Éste geólogo defendía la permanencia, a lo largo de las eras geológicas, de los mismos océanos y continentes que existen en la actualidad, como *estructuras fundamentales de la superficie terrestre* («permanentismo»). Tan sólo algunos incrementos en el área de los continentes, producidos en sus márgenes y relacionados con las orogenias, eran concebibles para Dana. Pero, sobre todo, cualquier basculamiento de la corteza que provocara un intercambio de zonas continentales y oceánicas quedaba totalmente excluido. Dana y sus seguidores fueron, en efecto, los primeros geólogos que defendieron la naturaleza distinta de las áreas continentales y los fondos oceánicos, y ello por deducción pura, al considerar que el resalte de los continentes y el hundimiento de las cuencas marinas tenían que estar motivados por causas litológicas y de densidad.⁹ Sin embargo, el permanentismo radical que defendían era incapaz de explicar las conexiones (orogénicas, estratigráficas, paleontológicas...) entre ambas orillas del Atlántico. Y como el contraccionismo suessiano admitía «puentes continentales» capaces de dar cuenta de tales correlaciones, pero ignoraba la heterogeneidad entre fondos oceánicos y áreas continentales, resulta que estas dos escuelas globalistas explicaban *cada una una sola cosa*, a costa de desentenderse por completo de otra igual de importante. Así que, como en el cuento hindú, uno de los ciegos palpaba la panza y el otro las patas del elefante, pero ninguno era capaz de imaginar la forma del animal.

⁹ DANA, J. D., «The continents always continents», *Nature*, n° 23, 1881.

2. La irrupción de la deriva de los continentes

En lo tocante a la visión científica de la Tierra, el paso del siglo XIX al XX estuvo marcado por dos acontecimientos clave: el descubrimiento de la radiactividad, que asestó un rudo golpe al direccionalismo, y el surgimiento de las primeras conjeturas sobre la movilidad continental. Entre ambas «revoluciones» no existió, en un primer momento, la menor relación; pero las dos contribuyeron a dinamizar la imagen de la Tierra: la «nueva» energía del átomo constituía una fuente de calor prácticamente inagotable que, de golpe, hacía retroceder indefinidamente tanto la edad del Sol como la de nuestro planeta, y que se revelaba suficiente para alimentar todos los procesos geológicos conocidos; y luego estaban las intuiciones que diversos geólogos –y también algunos *buenos aficionados*– exponían aquí y allá (Fisher en Inglaterra, Taylor en América, Wettstein y von Colberg en Alemania) acerca de una Tierra no rígida, cuyo interior fluido podía permitir el desplazamiento en superficie de las masas continentales.

Sin embargo, los únicos que, en torno a 1900, proponían una dinámica terrestre global eran los direccionalistas. Si entendemos por paradigma toda *idea explicativa sintética* que proporciona una guía coherente para la exploración de un cierto campo, puede defenderse perfectamente que el direccionalismo suessiano –que, por añadidura, acabó asimilando al uniformitarismo no dogmático– fue un paradigma geológico. No obstante, tal concepción, enraizada tanto en el inorganicismo de la física clásica como en la tradición de una Tierra sometida a una degradación continuada, estaba condenada a tener que hacer frente muy pronto a otra *gestalt* radicalmente distinta, deudora de otras tradiciones: la de una Tierra-sistema *que cambia sin apenas degradarse*, y que cuenta con partes móviles en un contexto global.

La historia de la geología, en los dos primeros tercios del siglo XX, fue todo menos lineal. Pese al predominio claro de la concepción suessiana, no existía un consenso generalizado ni sobre la estructura del globo ni sobre el modo de generarse las cadenas de montañas, los volcanes y los seísmos. Por otra parte, la especialización creciente, que parcelaba el «edificio común» de la ciencia, le acarrea a la geología algunas consecuencias negativas: los conocimientos de física y de biología general eran más bien

escasos entre los geólogos, que cada vez más tendían a asumir el papel de especialistas y renunciaban a tener la visión universalista en la que se enraizaba su propia tradición. De ahí que la presentación por Alfred Wegener de su hipótesis de la *deriva continental*, hace ahora justamente cien años, en 1912, fuese recibida sin especial entusiasmo ni hostilidad. A fin de cuentas, se trataba simplemente de un modelo elegante, que venía avalado por «pruebas» curiosas... Inicialmente, la mayor debilidad del modelo residía en lo limitado de sus propuestas explicativas, y llama la atención que fuese en una época en la que pocos creían ya en la teoría de Wegener, en 1929, cuando uno de los últimos movilitas de los tiempos heroicos, Arthur Holmes, planteara de forma rigurosa la posibilidad de que los desplazamientos continentales estuviesen causados por corrientes de convección, suministrando el mismo esquema explicativo que la tectónica de placas había de incorporar cuarenta años más tarde.

2.1. La hipótesis wegeneriana

La agitada y romántica vida del meteorólogo Alfred Wegener (1880-1930) ha dado pie a varias leyendas. Una de ellas quería que fuese durante su primera estancia en Groenlandia, entre 1906 y 1908, cuando le surgió el primer «chispazo» de su modelo de la Tierra, al ver como el hielo se cuarteaba generando inmensos icebergs como islas, que se separan flotando cada uno por su lado. No es esa, sin embargo, la versión que él ofreció de su *eureka*:

«Tuve la primera intuición de la movilidad continental ya en 1910, cuando, al contemplar un mapamundi, me impresionó la coincidencia de las costas de ambos lados del Atlántico; pero por el momento no hice caso de esta idea, que me pareció inverosímil. En el otoño de 1911 conocí, a través de un trabajo de síntesis que cayó en mis manos por casualidad, los resultados paleontológicos, para mí desconocidos hasta entonces, referentes a las primitivas conexiones entre Brasil y África. Esto me llevó a un examen atento, aunque fugaz, de los resultados de las investigaciones geológicas y paleontológicas referidas a esta cuestión, investigaciones que tuvieron enseguida confirmaciones tan importantes que hicieron arraigar en mí el convencimiento de que eran básicamente correctas»¹⁰.

¹⁰ WEGENER, A., *Origen de los continentes y océanos*.

Los estudios paleontológicos a que se refiere Wegener podrían ser los que Krenkel había publicado en la revista *Geologische Rundschau* en el referido año de 1911¹¹. Contando con esos datos, el alemán decidió profundizar en la idea, que le obsesionaba cada vez más, de un continente único («Pangea») que, millones de años atrás, habría integrado la totalidad de los continentes actuales, los cuales provendrían de la rotura de ese macrocontinente primitivo.

Wegener reunió en poco tiempo una amplia serie de argumentos y de pruebas empíricas que le proporcionaron una enorme confianza *subjetiva* en su hipótesis. Podríamos decir, sin temor a caer en exageración, que este gran anticipador se enamoró de su teoría... Fue sin duda la coherencia y elegancia de la hipótesis, su depurada *estética*, lo que le impulsó a apostar de la manera apasionada en que lo hizo –y que tanta irritación provocaba en sus oponentes– por un modelo de la Tierra basado en la deriva continental.

Hoy resulta evidente que la hipótesis wegeneriana superaba la contradicción entre los modelos globales de Dana y de Suess, cada uno de los cuales resolvía un problema a costa de ignorar el que resolvía el otro. Wegener mismo supo resumir en términos claros tanto el dilema como la solución –auténtica síntesis superadora– que él aportaba:

Pero, ¿cuál es la verdad? La Tierra no puede tener más de un rostro a la vez. ¿Hubo puentes continentales o estuvieron siempre los continentes separados por mares profundos? Es imposible rechazar la reivindicación sobre las antiguas conexiones terrestres si no queremos renunciar por completo a comprender el desarrollo de la vida en la Tierra. Pero es igualmente imposible rehuir los argumentos con los que los partidarios de la teoría de la permanencia rechazan los puentes intercontinentales hundidos. Evidentemente, queda tan sólo una posibilidad: tiene que existir un error oculto en suposiciones tomadas como evidentes.

El punto de partida de la teoría de la deriva es justamente este: la suposición, tenida por evidente tanto en la teoría de los puentes como en la de la permanencia, de que la situación relativa de los bloques continentales no ha cambiado debe ser falsa; los continentes deben haberse movido¹².

¹¹ En opinión de BROUWER (1980), trad. castellana de *Origen...*, 2ª nota de traductores en p. 13.

¹² WEGENER, *Origen...*, p. 26.

2.2. Del rechazo a la marginalización

Wegener explicó en detalle su hipótesis en un libro, *Origen de los continentes y océanos*, que conoció cuatro ediciones en vida del autor, y dos más en la década que siguió a su fallecimiento. En la década del 20, la obra se tradujo a cinco idiomas, uno de ellos el castellano. Después, una pesada losa de menosprecio institucional –más que de olvido– impidió que la obra fuese reeditada durante treinta años, hasta que en 1966 apareció su segunda edición en inglés. Los problemas mayores con que se topó Wegener de cara a la aceptación de su idea no provinieron de la escasez o inverosimilitud de los indicios favorables a la misma, sino de dos factores que han sido ya señalados, a saber, la endeblez de las hipótesis explicativas que proponía para el fenómeno que postulaba, y las insuficiencias de formación generalista de que adolecían tanto los geólogos como los biólogos, salvo honrosas excepciones, que les impedía captar la fuerza de numerosos argumentos esenciales, como los isostáticos, basados en la densidad necesariamente distinta de los materiales constitutivos de las dos grandes regiones, los continentes y los fondos oceánicos, en que se divide horizontalmente la corteza terrestre.

De forma consecuente, este polifacético investigador (cuya formación inicial, recordémoslo, no era de geólogo) defendió a capa y espada la necesaria interdisciplinariedad de los estudios geológicos globales, considerando el carácter restringido de la mayoría de los argumentos que se esgrimían en contra de su teoría como un grave obstáculo para la discusión en profundidad que la misma demandaba.

No vayamos a creer que todas las pruebas que proponía Wegener estaban igualmente bien fundadas. Pero eso no justifica el ensañamiento de los críticos, que hoy –con la perspectiva que proporciona el tiempo transcurrido– no deja de sorprender. Por ejemplo, a Dominique Lecourt, quien escribe: «No tanto habría que hablar de escepticismo para describir la acogida que se reservó en su momento a esta hipótesis [*la deriva continental*], como de brutal rechazo y de denigración sistemática»¹³. Un par de párrafos pueden servir como botón de muestra¹⁴:

¹³ LECOURT, D., «Wegener» en D. LECOURT, dir., *Diccionario de historia y filosofía de las ciencias*.

¹⁴ Citas recogidas por HALLAM, *De la deriva de los continentes a la tectónica de placas*.

José Luis San Miguel de Pablos

[El método de Wegener] en mi opinión no es científico, sino que sigue la trayectoria normal de una idea inicial: una búsqueda selectiva a través de la literatura para corroborar sus pruebas, ignorando los hechos opuestos a esta idea, y finalizando en un estado de autointoxicación en el cual una idea puramente subjetiva acaba siendo considerada como un hecho objetivo.

E. W. Berry

Los científicos que no son geólogos no tienen por qué saber que la geología en que se basa esta teoría [la de Wegener] es tan antigua como la física anterior a los Curie [...].

Así pues, la teoría de la deriva de los continentes es un cuento de hadas [*ein Märchen*]. Una fantasía que ha capturado la imaginación de muchos.

B. Willis

Alfred Wegener aparece, casi un siglo después, como el prototipo del investigador marginalizado injustamente, cuyas ideas acaban imponiéndose en lo esencial, mucho tiempo después de su muerte.

¿A qué pudieron deberse unas resistencias tan exageradas? Según Oreskes¹⁵ la principal razón tenía que ver con la exigencia implícita de modificar arraigadas actitudes epistemológicas (así, el cultivo «a la americana» de la vaguedad y/o pluralidad teórica en geología) y de estilo de trabajo (el «localismo» característico del geólogo de mediana escala, que fijaba la imagen tópica del profesional). Aun considerando acertada la opinión de Oreskes, me da la impresión de que lo que más molestaba de Wegener era que se atreviera a teorizar acerca de la Tierra de tal manera que obligaba a cambiar radicalmente la imagen que se tenía de ella. Como dice Anthony Hallam: «Se podría avanzar un paso más y sugerir que el peor obstáculo [*para la aceptación de la deriva*] no era tanto la carencia de datos como el paradigma estabilista en tanto que *gestalt* de la Tierra.»¹⁶ Ahora bien, ¿qué imagen, qué *gestalt*, era esa a la que se tenía tanto apego, y cuál era la nueva imagen que tales resistencias levantaba? La intuición central del modelo de Suess era, como hemos visto, el *enfriamiento* de la Tierra, causa de la *contracción* generadora de los fenómenos geológicos. La del modelo de Dana era la *permanencia* de los océanos y de los continentes, reconocidos correctamente como de naturalezas distintas y no

¹⁵ ORESKES, N., *The Rejection of Continental Drift*.

¹⁶ HALLAM, *De la deriva de los continentes a la tectónica de placas*.

intercambiables. Ambas imágenes del planeta *parecían* oponerse, pero en realidad contaban con un presupuesto de fondo idéntico: tanto la degradación térmica continuada como la inmovilidad caracterizan a los objetos inertes, y lo que haría entonces esa inmensa bola de piedra que vendría a ser la Tierra sería simplemente manifestar propiedades comunes a todos ellos. Pero hete aquí que llega alguien proponiendo un modelo según el cual la superficie de la Tierra (la única región accesible, no se prejuizaba el interior) está *animada* por unos extraños movimientos de traslación aparentemente no debidos a degradación térmica, que parecen revelar una peculiar vitalidad. No hacía falta hablar de «super-organismo»: el majestuoso despliegue de los continentes componía ya una imagen dinámica que ciertamente valía más que miles de palabras.

2.3. Las alternativas al movilismo

Que la mayoría de los científicos de la Tierra –y de las instituciones en las que éstos participaban– no diesen crédito a la teoría de los desplazamientos continentales en el período comprendido entre 1925 y 1965, no significa que durante esas cuatro décadas la teoría de Wegener se volatilizara. Conviene recordar que marginalización no es sinónimo de desaparición, y en todo ese tiempo la «danza de los continentes» ejerció una notable fascinación tanto sobre el gran público como sobre una minoría de geólogos, de los que algunos se convirtieron en ardientes propagandistas de la misma. Por lo demás, la deriva continental se seguía enseñando, como algo más bien inverosímil pero acerca de lo cual «nunca se sabe».

¿Qué concepciones alternativas defendían los críticos de la *deriva*? La mayoría de ellos permanecían fieles a un modelo de la Tierra en que las áreas continentales y las oceánicas intercambiaban posiciones mediante hundimientos y emersiones, en línea con las ideas de Suess. Asimismo las correlaciones entre áreas continentales distantes se seguían explicando por «puentes intercontinentales». Los defensores de este punto de vista eran incapaces de ofrecer para él mecanismos explicativos verosímiles, por más que algunos apelasen débilmente a la contracción de la Tierra.

Es cosa curiosa que dos *teorías de la Tierra* formalmente opuestas, una que defendía la contracción y otra la dilatación del globo, hayan estado ambas presentes en los años que precedieron a ese «encaje de las piezas del rompecabezas» que fue la *revolución científica* de la tectónica de placas. Estas dos *gestalten* contrapuestas no eran, sin embargo, simétricas, dado que la primera aparecía como el postrer eslabón de una larga tradición, en tanto que la segunda fue una novedad que surgió en cierto modo como *polo imaginal* complementario.

En cuanto a la *expansión de la Tierra*, habría que distinguir entre la «imagen en sí» de una Tierra inflacionaria y las teorías científicas que la postulaban. El objeto de referencia de la primera es extremadamente simple y un poco grotesco: un globo que se hincha por la presión del gas que contiene. Tal evocación no es ningún despropósito: fue así como, casi literalmente, se presentó la primera «teoría» de la expansión terrestre, la de Mantovani (1889), un imaginativo diplomático aficionado a la geología, que, siendo cónsul en la isla Reunión, concibió la peregrina teoría en cuestión. No sabiendo gran cosa de Física, Mantovani apenas trató de fundamentar de manera verosímil su idea, aunque, en realidad, lo que hizo fue aportar una imagen telúrica «que faltaba», un poco a la manera de un escritor que con sus metáforas contribuye a amueblar nuestro universo intersubjetivo.

Y hay que añadir que la imagen del globo inflacionario prosperó: durante varias décadas se consideró que una explicación de la deriva continental perfectamente verosímil era la expansión de la Tierra. ¿No se estaba precisamente entonces (Hubble, 1929) modelizando la expansión del universo mediante un globo que se hincha, sobre cuya superficie están «pintadas» las galaxias? Por otra parte, cada vez eran más los geólogos y geofísicos, con Arthur Holmes a la cabeza, que pensaban que el problema de la evacuación del calor generado en el interior del globo por la desintegración radiactiva distaba mucho de estar resuelto, y que este problema sólo podía tener dos soluciones: o eficaces mecanismos de disipación (era por lo que apostaba Holmes) o... la dilatación de la Tierra. Así pues, la *gestalt* de Mantovani «venía muy bien» cuarenta años después de haber sido concebida.

Varias teorías de la expansión terrestre surgen, en efecto, a partir de 1930, y conocen su momento de gloria en los años cincuenta y sesenta. Como una dilatación importante del globo implica necesariamente el desgajamiento y la separación de los bloques continentales, los «expansionistas» pasan a ser, durante las cuatro décadas de marginalización de la teoría de la deriva, una de las corrientes de sus partidarios. Pero es que, además, mediado el siglo XX, la *gestalt* de la expansión se independiza de la causa hipotética que la había hecho respetable, el calentamiento radiactivo de la Tierra. El físico inglés Paul Dirac (1902-1984) había emitido, en 1937, una célebre hipótesis que lleva su nombre: la de la disminución, en el transcurso de los tiempos geocosmogónicos, de la «constante» gravitacional g ,¹⁷ y en 1952, Jordan extrajo las consecuencias de dicha hipótesis para el caso de la Tierra: si g ha disminuido, la presión gravitacional que comprime al planeta habrá decrecido sin que haya habido disminución de masa, y el resultado habrá sido la dilatación del globo.

El interés que suscitó la hipótesis de Dirac relanzó la teoría de la expansión cuando ya estaba en puertas la revolución geotectónica. Incluso el que llegó a ser máximo impulsor de la tectónica de placas, Tuzo Wilson, apostaba todavía en 1960 por el expansionismo,¹⁸ refiriéndose de manera explícita a la hipótesis de Dirac.

3. Una energía que se abre camino

Desde un punto de vista histórico, no cabe la menor duda de que el descubrimiento de la generación continua de calor a partir de los procesos de desintegración radiactiva tuvo un efecto importante tanto para la evolución de las ciencias de la Tierra como sobre la imagen del planeta. Como ya hemos visto, muy poco tiempo después del descubrimiento del radio y su peculiar actividad ya se alzaban voces proponiendo una revisión radical del modelo del enfriamiento continuado, que se quedaba sin fundamento físico desde el momento que existía una fuente de energía nueva capaz de compensar la pérdida de *calor residual*.

¹⁷ DIRAC, P. en *Nature* (139), 1937, p. 323.

¹⁸ WILSON, T., «Some consequences of expansion of the Earth», *Nature* (185), 1960.

Frente al nuevo dato se definieron dos posturas, que pueden resumirse mediante los términos «minimización» y «magnificación». De las posturas minimizadoras ya se ha hecho mención, pero estaba también la otra postura, la que concedía una enorme trascendencia geológica a la existencia de una energía interna no meramente residual que aunque no puede ser eterna posee una tasa de producción compatible con el mantenimiento de un calor interno terrestre estable o creciente. Esta postura «energetista» contribuyó a reverdecer la vieja intuición huttoniana de una Tierra que se autorregenera: «El lento trabajo de levadura de la radiactividad –escribió Arthur Holmes tras su «conversión» al energétismo– permite a la Tierra rejuvenecerse periódicamente»¹⁹. Ahora bien, ese «lento trabajo de levadura» tenía que ver con la disipación del calor que se iba acumulando en el interior de un globo terráqueo poseedor de un porcentaje apreciable de elementos radiactivos. Y la *función disipativa* asociada era la que hacía nacer los ciclos, esos mismos ciclos que postulaba Hutton apostando por el calor interno. Más de medio siglo antes de que Prigogine sistematizase el significado y las modalidades de las estructuras disipativas, Bénard, en 1900, había estudiado el caso más sencillo, el de un líquido contenido en un recipiente aplanado que se calienta lentamente por abajo; y había observado la formación de células de convección hexagonales que estructuran tanto la superficie como todo el volumen del líquido.

3.1. La «Tierra-corazón» de Joly

A uno de los primeros científicos que se sintieron fuertemente impresionados por las consecuencias que la existencia de la radiactividad podía tener para la Tierra, el británico John Joly (1857-1933), profesor de Geología en Dublín, se debe un modelo global que, pese a ser muy diferente formalmente al de la tectónica de placas, posee con ella un claro parentesco.

La hipótesis de Joly parte de rechazar el confinamiento estricto de los elementos radiactivos en la capa más superficial de la corteza, y de admitir en consecuencia una acumulación inevitable y progresiva de

¹⁹ HOLMES, A., «Radioactivity and the Earth's Thermal History», parte V («The Control of Geological History by Radioactivity»), en *Geological Magazine* (62), 1925.

calor en las zonas profundas de esa misma corteza o en su base. En un libro²⁰ y en varios artículos aparecidos entre 1923 y 1928, Joly expone las consecuencias que tiene, según su concepción, dicha acumulación de calor: hay un momento en que las rocas de la base de la corteza se encuentran a una temperatura que queda justo por debajo de su punto de fusión, pero enseguida la continua emisión de calor por los elementos radiactivos hace que ese límite se sobrepase, y entonces tales materiales se funden, se genera masivamente un magma cuyo volumen es mayor que el de las rocas iniciales, de modo que se produce un fuerte aumento de la presión subcortical. Fallas de tensión, fisuras y grietas se forman en múltiples puntos de la superficie terrestre. Tiene lugar un importante incremento del vulcanismo, se producen efusiones de lava, sobre todo en los fondos oceánicos, y el globo en su conjunto experimenta una cierta expansión. Ahora bien, todo esto permite que una fracción significativa del calor acumulado en la base de la corteza se evacue; y al suceder esto, el magma vuelve a solidificarse, se produce una contracción generalizada que tiene por consecuencia la formación de corrugaciones orogénicas, y el diámetro terrestre se reduce de nuevo. A partir de ese momento, el calor radiactivo vuelve a tener dificultades de evacuación, de manera que vuelve a acumularse. Y el ciclo recomienza.

La imagen gestáltica de una «Tierra-corazón» pasa así a ocupar un hueco que faltaba por llenar en el *imaginario telúrico*.

Este modelo implica ciertamente una estructura disipativa global. La «forma de conjunto» que emerge es la de una esfera palpitante que despliega dinámicas cíclicas, y hay que señalar además que este modelo prevé desplazamientos continentales, que se producirían solamente en las *fases fusionales*, las únicas en que los continentes cuentan con un sustrato fluido. Por grandes que sean las diferencias entre este modelo y el de la tectónica de placas, ambos se basan en la asunción de la necesidad de que la dinámica interna terrestre se organice de tal forma que la Tierra funcione como un termostato. Si «la Tierra de Joly» posee una fisonomía tan marcadamente cíclica es porque su termostato funciona de manera sincopada, pero pueden existir otros modos de disipar el calor que se genera en el interior del globo... Sean éstos los que fueren, deberán ba-

²⁰ JOLY, J., *The Surface History of the Earth*. Oxford, 1925.

sarse necesariamente en ciclos, según ha probado la investigación de las estructuras disipativas. Una estructuración que se podía llamar *proserpínica*²¹ surge, pues, necesariamente cuando la energía generada ya no puede ser disipada directamente por irradiación. Ahora bien, precisamente un modo más suave que el concebido por Joly, de disipación de la energía geotérmica es el que suministra el *modelo geotectónico*, la tectónica de placas, cuyo potencial estructurante global es, por otra parte, muy superior al de la «Tierra palpitante» del profesor de Dublín.

Finalizaré esta referencia indicando que es muy posible que el sorprendente modelo telúrico de Joly se realice... en Venus. Pues la dinámica efusiva que se ha detectado en el planeta vecino parece ser, en efecto, a la vez periódica y «catastrófica».²²

3.2. Un motor térmico para la deriva continental

A la larga polémica sobre si el interior de la Tierra es sólido o fluido se superpuso otra a partir de finales del siglo XIX, centrada en la existencia o no de corrientes telúricas de convección.

Aunque los partidarios de la convección terrestre no apostaban necesariamente por la deriva continental, tampoco eran proclives a oponerse a ella, dado que el sustrato fluido que suponían era, de hecho, una de las condiciones de la hipótesis wegeneriana.

En la segunda década del siglo XX, el problema estaba planteado de la siguiente manera: existían evidencias de elevaciones y descensos de áreas continentales, a causa de variaciones de la carga glaciaria. Un buen ejemplo lo proporciona Escandinavia. Ahora bien, estos *movimientos isostáticos* verticales exigen, para poder producirse, un sustrato fluido... ¡El mismo que la transmisión de las ondas sísmicas parecía excluir! Pero está claro que sin un cierto grado de fluidez no puede haber corrientes de convección, flujos, en suma, de materia. La clave podría residir en la *extrema lentitud* del proceso: un material que, como el lacre o el hielo, es sumamente quebradizo frente a esfuerzos breves e intensos, fluye si las fuerzas aplicadas «no tienen prisa», tal como se constata con los dos

²¹ De Proserpina (Perséfone entre los griegos), hija de Deméter, que estableció el ciclo de las estaciones.

²² Ver HERRICK, R. R., «Resurfacing history of Venus»; en *Geology* (22), 1994.

materiales que se acaban de citar (y en el caso del hielo, observamos como las lenguas glaciares corren como agua a lo largo de siglos y milenios). Por otra parte, estaba el problema de la disipación del calor interno. Los que pensaban que el manto contenía una proporción apreciable de elementos radiactivos estaban obligados a afrontar el problema de cómo se disipaba la energía que generaban, puesto que la reducida conductividad térmica de las rocas supone un serio problema. La cuestión, estudiada por Rayleigh y Jeffreys entre otros, era saber si la elevación de la temperatura con la profundidad bastaba para permitir que las rocas fluyesen a unas cuantas decenas de kilómetros bajo la superficie, sin necesidad de llegar a fundirse (cosa, esta última, incompatible con los datos sismológicos)²³.

Dos artículos de Arthur Holmes, publicados en 1928 y 1931, constituyen el máximo testimonio de que la concepción de fondo que subyace a la tectónica de placas «ya estaba ahí» treinta años antes de la formulación *histórica* del modelo. Holmes se centra, en su texto de 1931,²⁴ en el problema de la disipación del calor radiactivo. Sólo secundariamente trata de la deriva continental. En realidad, para él la cuestión no es «deriva sí o deriva no», sino cómo se evacua el calor que se produce en el interior de la Tierra. No se trata, como era el caso para Wegener, de explicar a toda costa un fenómeno de superficie cuya realidad se postula de entrada, sino de averiguar *qué sucede con una energía* —el calor interno— que, siendo en sí misma un «efecto necesario», necesita abrirse un camino de salida. El enfoque es completamente distinto del que mantenía el berlinés: en vez de lanzarse a conjeturar, para dar cuenta «como sea» de un determinado efecto tenido por cierto y fundamental, Holmes acaba desembocando sobre ese mismo efecto, pero viéndolo como *una simple consecuencia lógica* de una causa motriz (el calentamiento interno acumulativo, en busca de alguna forma de disipación) que él considera lo verdaderamente importante. Dice Holmes: «Uno de los objetivos del presente artículo es discutir un mecanismo para descargar el exceso de calor, que implicaría una circulación de materia en el sustrato mediante corrientes de convección; y asimismo examinar la deriva continental causada por dichas corrientes»²⁵. Para añadir: «Para evitar el calentamiento

²³ RAYLEIGH en *Phil. Mag.*, 32, 1916, 529-546.

²⁴ HOLMES, A., «Radioactivity and Earth movements», en *Transactions of the Geol. Soc. of Glasgow* (18), 1931.

²⁵ HOLMES, A., «Radioactivity and Earth movements», *op. cit.*, p. 565.

permanente [*de la Tierra*] es necesario contar con un proceso, tal como la deriva continental, que haga posible la emisión del calor»²⁶.

La intuición *avant la lettre* de las estructuras disipativas estaba, por tanto, presente ya en Holmes, a partir del problema de la disipación geotérmica. La solución que él encuentra a este problema sigue de cerca el modelo convectivo de Bénard y justifica los desplazamientos continentales. Todo un modelo teórico coherente y elegante que habría merecido mejor fortuna que la de dormir en las hemerotecas durante cuatro décadas.

4. Un cambio prototípico de paradigma

Aparte de un cierto dogmatismo, que no son pocos los historiadores de la Geología en señalar, el mayor problema durante el período 1925-1950 era la escasez de datos, tanto sobre el interior de la Tierra como sobre los fondos oceánicos. Pero los años que siguieron a la Segunda Guerra Mundial fueron un período prerrevolucionario para las ciencias de la Tierra... Afirma Kuhn que en etapas como esa se acumulan los *enigmas*, datos observacionales que las teorías aceptadas son incapaces de explicar sin recurrir a rebuscadas hipótesis. Asegura también que es entonces cuando, por lo común, los partidarios de tales teorías más se resisten a reconocer el fracaso de las mismas, desplegando en su defensa actitudes dogmáticas, cosa que él considera normal y hasta positivo para el desarrollo de la ciencia, ya que el «pulso» entablado entre la resistencia de las viejas ideas y el empuje de las nuevas constituye la *tensión esencial* que preside todo gran salto importante del conocimiento²⁷.

Estos rasgos se hicieron presentes de forma extremadamente nítida en el ámbito de los estudios globales de la Tierra, entre 1945 y 1965: la exploración de los fondos oceánicos, vuelta al fin posible, aportó una gran cantidad de datos enigmáticos, mientras el *establishment* de los geólogos y geofísicos adversos a la movilidad continental endurecía sus posiciones.

²⁶ *Ibid.*, p. 574.

²⁷ KUHN, T., *La tensión esencial*. Fondo de Cultura Económica, México, 1983.

4.1. Los nuevos datos oceanográficos

Fueron, en efecto, los océanos los que suministraron las observaciones decisivas que acabaron haciendo insostenibles los modelos fijistas y llevando a una revisión del juicio negativo que pesaba sobre la hipótesis de la deriva continental. La investigación oceanográfica mediante sondeos despegó con fuerza entre 1945 y 1950, y los primeros resultados aportaron dos grandes sorpresas: la primera fue el descubrimiento de las cordilleras dorsales oceánicas, de carácter volcánico (lo que implica que a través de ellas fluye una elevada cantidad de calor), con una depresión central (o *rift*) y con una extraña continuidad alrededor de la Tierra; la segunda la constituyó la comprobación de que en el fondo del mar no hay en absoluto rocas graníticas, así como tampoco rocas sedimentarias anteriores al Mesozoico. Esto último supuso, entre otras cosas, la invalidación de la idea, muy extendida hasta entonces, de que el Pacífico era un «océano arcaico» cuyo lecho era contemporáneo de la consolidación del globo. E hizo surgir la pregunta de por qué no hay océanos arcaicos, de por qué los fondos oceánicos son tan jóvenes a diferencia de los continentes cuyas variadas litologías dan testimonio de todas las edades del planeta (existen, de hecho, en los continentes rocas metamórficas de 4.000 millones de años, casi coetáneas de la formación de la Tierra). Por otra parte, un sustrato basáltico —es decir, volcánico— se encontró en todos los océanos por debajo de la capa de sedimentos. Se confirmaba, pues, plenamente la conjetura de Wegener y Dana de que debían existir acusadas diferencias litológicas entre los fondos oceánicos y los escudos continentales.

Por otra parte, cuando se avanzó lo suficiente en dos importantes tareas de apariencia rutinaria, como son el recuento de los puntos volcánicos (actuales o históricos), y el de los terremotos importantes registrados a lo largo de la historia, se vio que tales fenómenos telúricos no se reparten al azar, sino que se concentran —en términos estadísticos— en ciertas zonas geográficas lineales.

Se observó también que el vulcanismo oceánico es, generalmente, muy distinto del continental: los volcanes de las dorsales emiten lavas basálticas, pobres en sílice; por el contrario, los de los márgenes continentales sísmicamente activos —como por ejemplo, los existentes en la cordillera de los Andes— dejan escapar lavas «andesíticas» cuyo alto porcentaje de sílice es similar al de los granitos.

Además la localización precisa de los focos de los terremotos que se producen en ciertos márgenes continentales (como las costas orientales de Asia) permitió determinar que se sitúan estadísticamente sobre un plano inclinado que se sumerge bajo el continente formando un ángulo de 45 °C (*plano de Benioff*). Y el desarrollo alcanzado por las técnicas gravimétricas condujo a la detección de las raíces de baja densidad que poseen las cadenas de montañas y las mesetas elevadas; y paralelamente a la plena confirmación de la alta densidad de los fondos oceánicos por la que Wegener tanto había batallado.

4.2. Componiendo el rompecabezas

Los hallazgos geológicos y geofísicos que se acaban de reseñar, no fueron los únicos que se realizaron en las *décadas prodigiosas* que van desde el final de la SGM a los primeros años setenta. Hay que señalar también el descubrimiento de que el grosor de la corteza oceánica (unos 10 km) es considerablemente menor que el de la corteza continental (30-40 km). Asimismo, el desarrollo de nuevos métodos de correlación entre series estratigráficas de distintos continentes llevó a establecer continuidades transoceánicas insospechadas. Y la aplicación de los recién inventados ordenadores al análisis del ajuste entre continentes separados entre sí por océanos, permitió llegar finalmente a la conclusión de que coincidencias morfológicas, como las que cualquiera puede apreciar mirando un mapa, entre la costa oriental de Sudamérica y la occidental de África, no pueden ser, en modo alguno, casuales. E incluso sirvió para establecer que el mejor ajuste posible se da entre las plataformas continentales y no entre las líneas de costa.

Se diría, pues, que la Tierra iba entregando, una tras otra, las piezas de su rompecabezas, pero no «la imagen oculta». Dar con ella requería algo más.

Partiendo de un reciente descubrimiento geofísico, el de las inversiones periódicas del campo magnético terrestre, dos jóvenes científicos, F. J. Vine y D. H. Matthews, dieron con una prueba brillante de la expansión de los fondos oceánicos, que permitía, por añadidura establecer una técnica para medir su velocidad: suponiendo que el suelo marino basáltico nazca realmente en unas dorsales que no son sino zonas en las

que tiene lugar una efusión volcánica lenta y continua, entonces los microcristales magnetosensibles contenidos en el magma deberán registrar la orientación del campo magnético terrestre en el momento en que se enfrían. Los nuevos aportes magmáticos que no cesan de afluir desde el manto, no sólo elevan la dorsal sino que la ensanchan hacia ambos lados, causando así la expansión del suelo oceánico; y como esos magmas ascendentes se magnetizan al enfriarse, registrarán el sentido del campo magnético, cualquiera que éste sea... Y así, a lo largo de un proceso de duración indefinida.

Este mecanismo da como resultado una especie de «grabación doble» y simétrica, sobre el suelo oceánico en continuo crecimiento, de todas las inversiones geomagnéticas que han tenido lugar desde que nació la dorsal. Sólo faltaba una tabla geocronológica de las inversiones —obtenida poco después— para poder conocer la velocidad a que tiene lugar la expansión de las distintas regiones del suelo oceánico.

Publicada en *Nature*²⁸, esta propuesta, basada en una inteligente conjunción de datos oceanográficos y geofísicos, ha quedado como un ejemplo clásico de lo fructíferos que pueden ser los enfoques interdisciplinarios.

Imposible, por otra parte, no hacer referencia a Tuzo Wilson. Este geofísico de la Universidad de Toronto fue el primero en concebir las *placas tectónicas* propiamente dichas. Hombre de gran imaginación y capacidad de síntesis, sin demasiados problemas a la hora de remplazar sus hipótesis básicas si entendía que era necesario, Tuzo Wilson anticipó numerosos rasgos y consecuencias de la geotectónica. Se dio cuenta asimismo de que un fenómeno de escala mundial, como el de la extensión del suelo oceánico a partir de las dorsales, complementado por la «subducción» de dicho suelo en las fosas marinas, exigía una *estructuración global* de la superficie esférica del planeta. Para que semejante estructuración fuera posible era preciso resolver algunos arduos problemas con un pie en la geología y otro en la geometría esférica. Al conseguir resolverlos, Wilson estableció un esquema satisfactorio del sistema mundial continuo que forman las dorsales «emisoras», las fosas «receptoras» y las «fallas transformantes» que él descubrió y que completan el modelo²⁹.

²⁸ VINE, F. J. y MATTHEWS, D. H., «Magnetic anomalies over oceanic ridges», en *Nature* (199), 1963.

²⁹ WILSON, T., «A new class of faults and their bearing on continental drift», en *Nature* (207), 1965.

José Luis San Miguel de Pablos

Tuzo Wilson tenía una lúcida visión global y transdisciplinar, le interesaba la filosofía y desde que cayó en sus manos *La estructura de las revoluciones científicas* de Kuhn proclamó que la nueva teoría de placas suponía una revolución científica prototípica que concernía a las ciencias de la Tierra.

4.3. Clic gestáltico en el Observatorio Lamont

Toda esta danza de datos e ideas cristalizó entre 1965 y 1971 en una concepción neoparadigmática de la estructura y el funcionamiento dinámico de la Tierra. Vale decir que la inmensa mayoría de los fenómenos causados por fuerzas del interior del globo, tanto si el ritmo de manifestación de los mismos se da a la escala temporal humana (erupciones volcánicas, terremotos...) como si es mucho más lento (orogenias, modificaciones continentales y marinas), pueden ser explicados por el *explanans* que proporciona el modelo geotectónico. Incluso algunos problemas planteados en campos ajenos a la geodinámica interna, como enigmas paleoclimáticos y paleontológico-evolutivos, son iluminados por él.

Muchos años después de haber sido superada, caben pocas dudas de que la concepción *estabilista* de la Tierra era un condicionante fuerte para muchos geólogos. Pues compartir una *tradición de investigación* que excluía la movilidad continental les hacía experimentar una resistencia poderosa ante una heterodoxia científica que era tenida incluso por regresiva, en la medida que implicaba recuperar una «vieja y desacreditada teoría».

Un botón de muestra muy curioso de lo que se ha llamado «la conversión de los científicos de la Tierra»³⁰ lo suministra el Observatorio Geofísico Lamont, adscrito a la Universidad de Columbia: durante décadas, la postura de ese centro hacia el movilismo había sido resueltamente adversa, y su director, Maurice Ewing, era uno de los geólogos más hostiles a los «residuos wegenerianos». Pero hacia 1965 varios investigadores del Observatorio se pusieron a estudiar las anomalías magnéticas de diversas áreas oceánicas, y llegaron a las mismas conclusiones que Vine y Matthews; es más, sus resultados disiparon las últimas dudas que Vine

³⁰ Fórmula utilizada por HALLAM, entre otros.

tenía todavía acerca de que la expansión del suelo marino fuese la mejor interpretación posible de los bandeados magnéticos simétricos.

El cambio de actitud de los científicos del Lamont fue tan espectacular que un visitante movilista escribió: «me sentía como un cristiano llegado a Roma justo después de la conversión de Constantino».³¹

Poco después, uno de los padres del modelo geotectónico, R. S. Dietz, pudo escribir lo siguiente:

La historia de la ciencia está llena de disparatadas hipótesis. La mayor parte de ellas se olvidan, lo cual es lo mejor que puede suceder, pero de vez en cuando una se desempolva y pasa a ser una luminosa verdad. Así ocurrió con la idea de que la Tierra era una esfera girando en el espacio sin sostén alguno. En la actualidad, esto está ocurriendo con la teoría de la deriva continental, la cual aboga por el hecho de que todos los continentes estuvieron unidos, formando una sola masa denominada Pangea. Este continente universal se rompió de algún modo, y sus fragmentos se han trasladado hasta su presente localización.

Durante los tres últimos años, los geólogos y geofísicos se han visto obligados a abandonar sus viejas ideas respecto a que la corteza terrestre estaba esencialmente fija, para aceptar la «nueva herejía» que la supone móvil. La idea de que los continentes pueden trasladarse miles de kilómetros en unos cientos de millones de años es hoy aceptada por todos. La geología se encuentra, pues, actualmente, en la misma situación en que se encontraba la astronomía en la época de Copérnico y Galileo³².

La referencia a Copérnico y Galileo nos hace recordar que estos dos genios del Renacimiento no fueron innovadores absolutos, puesto que dos mil años antes Aristarco de Samos ya había propuesto un modelo heliocéntrico. Y este precedente, que se tiende a olvidar, nos devuelve al movilismo continental, puesto que hubo un Wegener medio siglo antes de la «herejía triunfante» de la tectónica de placas. Es esto lo que mueve a Naomi Oreskes a decir que «en la senda de la historia se hallan esparcidas las creencias de ayer que fueron prematuramente tiradas a la basura. Pues el presente está lleno de resurrecciones epistémicas»³³.

³¹ Se trata de S. RUNCORN, geólogo; cit. por FRANKEL en *British Journal of History of Science* (11), 1978.

³² DIETZ y HOLDEN, «La disgregación de la Pangea» en *Deriva Continental y tectónica de placas*.

³³ ORESKES, N., *The Rejection...*, op. cit.

4.4. La nueva imagen de la Tierra

Como hemos visto, no está claro que la Tectónica de Placas remplace a otro paradigma geológico previamente admitido de forma generalizada. En lugar de él, encontramos esas múltiples propuestas explicativas en pugna entre sí, con intervalos de hegemonías inestables, que Kuhn considera típicas de una ciencia inmadura. ¿La consagración de la Tectónica de Placas como su primer paradigma, habría supuesto, pues, la maduración de la geología como ciencia? Muchos lo creen así, pero veamos qué imagen, qué *gestalt* de la Tierra despliega ante nosotros el paradigma geotectónico:

- Podemos reconocer, de entrada, una *estructura* que no es estática sino dinámica, y que no se refiere únicamente a la capa terrestre superficial (la *litosfera*) sino que tiene raíces más profundas, las cuales penetran más allá de la capa inmediatamente subyacente (el *manto*), que es donde reside la causa inmediata (las *corrientes de convección*) de la movilidad horizontal. Esta estructura es *global*, es decir, no afecta tan sólo a algunas zonas del planeta, sino a todo él. Implica además la existencia de elementos (como las *placas tectónicas*) que pueden ser estudiados por separado en muchos aspectos, pero que no son genética ni dinámicamente independientes, ni entre sí ni de la Tierra en su conjunto.
- La «revolución geotectónica» ha puesto de relieve el carácter fundamentalmente *dual* de la corteza terrestre: en las áreas que cubren las aguas marinas (y en algunas raras zonas continentales llamadas a ser anegadas) existe *corteza oceánica* basáltica y en juvenil expansión a partir de las cordilleras dorsales; los continentes, por su parte, están formados por *corteza continental* ligera, cristalina en su mayor parte, y con zonas muy antiguas. El hecho de que existan dos clases completamente diferentes de corteza tiene su reflejo topográfico en la bimodalidad que presentan las curvas de nivel a escala global, o lo que es lo mismo, en la existencia de dos «escalones» en el globo, perfectamente marcados: el correspondiente a las cuencas oceánicas y el que representan los continentes. Esta bimodalidad es una característica singular del planeta Tierra.

- La dinámica global recientemente descubierta implica el desarrollo continuado de dos procesos complementarios de generación y destrucción de corteza oceánica, que se producen respectivamente en las dorsales y en las zonas de subducción.
- Las cadenas de montañas se forman como resultado de diferentes formas de compresión condicionadas por el movimiento de las placas. Puede tratarse de una compresión intercontinental directa, acompañada normalmente de algo de subducción (Himalaya, Alpes), o puede estar en juego el empuje mantenido de la corteza oceánica al sumergirse bajo un escudo continental, junto con el vulcanismo que este proceso genera (Andes). Es por esta razón que las cordilleras tienen forma lineal. Su situación geográfica, en unos casos (como los citados) nos informa de la dinámica de placas actual, y en otros (las montañas escandinavas, los Apalaches...) da testimonio de dinámicas arcaicas, fósiles.
- La panorámica temporal (o *histórica* en sentido geológico) que nos presenta la Tectónica de Placas es fascinante: todos los continentes actuales estaban reunidos en uno solo hacia comienzos del Mesozoico, hace entre 250 y 200 millones de años. Se produjo primeramente la escisión de este supercontinente en dos grandes masas, una septentrional y la otra meridional, llamadas respectivamente Laurasia y Gondwana, que ya postulaban a principios del siglo XX los partidarios de la deriva. Más tarde, el océano Atlántico se fue ensanchando mientras se definían los continentes actuales. Entretanto ocurrían algunos hechos marginales espectaculares, como la deriva aparente³⁴ del subcontinente indostánico hacia el norte, hasta comprimirse contra el escudo eurasiático, dando así nacimiento al Himalaya. Y este proceso no se detiene: actualmente una dorsal joven penetra en África oriental, de Djibuti al sur de los Grandes Lagos. Toda esa inmensa depresión volcánica está llamada a transformarse en un brazo de mar que desgajará del continente una gran isla de forma alargada.

³⁴ Aparente, en efecto, puesto que en realidad los continentes no navegan libremente, sino que se desplazan unidos a la corteza oceánica en expansión.

¿Y que ocurría en el pasado remoto, antes de Pangea? Los teóricos de la geotectónica están de acuerdo en que el binomio escisión-separación continental no se ha producido una sola vez, sino que se repite cíclicamente. Es así como ha nacido la noción de un megaciclo continental con el que Wegener no soñó siquiera: los continentes se juntan cada 500 millones de años, para volver a separarse después a partir de los nuevos rifts y las nuevas dorsales que se forman a causa de las tensiones que las corrientes de convección originan en la corteza³⁵.

Las consecuencias climáticas y biológicas de este inmenso latido telúrico son importantísimas: a mayor concentración de las tierras emergidas, mayor aridez en su vasto interior, así como temperaturas más extremas; y también mayor homogeneidad genética de los organismos terrestres, que se ven obligados a coevolucionar en contacto estrecho, desde el momento que todos ellos ocupan un único continente. Un megaciclo climático y otro de disminución-aumento de la biodiversidad se establecen, por tanto, a consecuencia de la repetición del proceso de concentración y separación continental.

5. Nuevos enigmas

¿Tuvo siempre la Tierra una estructuración dinámica como la que describe la teoría de las placas tectónicas? ¿Por qué existe? ¿Qué condiciones la hacen posible? ¿Está presente únicamente en la Tierra, o es una característica general de los planetas sólidos? He aquí algunas de las preguntas que ha puesto sobre la mesa el nuevo paradigma movilista que se ha impuesto en el último tercio del siglo XX.

Dice Anthony Hallam que ahora, culminada ya la «revolución geotectónica», la geología entra en una fase de *ciencia normal*, caracterizada por el desafío de nuevos enigmas como los que se acaban de formular, que son coherentes con la nueva concepción y que pueden, en principio, resolverse en su marco.³⁶ De hecho, está sucediendo así, y es por ello que el propio Hallam, Tuzo Wilson y otros muchos científicos de la Tierra piensan que el modelo kuhniano del cambio en ciencia se aplica aquí a la perfección.

³⁵ Ver MURPHY, B. y NANCE, D., «Las cordilleras de plegamiento y el ciclo supercontinental».

³⁶ HALLAM, A., *De la deriva de los continentes a la tectónica de placas*.

Veamos algunas respuestas posibles a los nuevos enigmas que acaban de plantearse.

1. La primera cuestión es muy controvertida. Durante bastantes años se ha considerado poco verosímil que placas similares a las actuales hayan existido desde la formación misma de la Tierra, pero hoy algunos piensan que sí ha sucedido. Se ha apuntado a un planeta arcaico con una delgada corteza que permitía un elevado flujo de calor, a través de la cual se abrían camino numerosas efusiones magmáticas³⁷. Una dinámica de «microplacas» habría precedido a la tectónica actual.

Los científicos de la Tierra asumen hoy que la capa superior del manto forma parte de las placas, siendo todo el espesor de manto que subyace, el sustrato sobre el que tales *placas litosféricas* (y no «corticales») se mueven. Observemos que esta concepción tiende a implicar a zonas de la Tierra cada vez más profundas³⁸.

2. La discusión sobre las causas de que una dinámica como la de las placas se despliegue en nuestro globo, nos lleva muy lejos. La causa inmediata son las corrientes de convección, pero cabe preguntarse qué es lo que provoca esas corrientes. La respuesta es, como sabemos, el *calor interno terrestre*, o mejor dicho, la evacuación de dicho calor; una respuesta que no aclara mucho, teniendo en cuenta que las corrientes de convección no son otra cosa que flujos térmicos de materia, pero que tiene la virtud de recordarnos que el enfriamiento de la Tierra no es un proceso simple y continuado de emisión del calor residual, sino que hay que contar además con una producción suplementaria de calor radiactivo, por lo que el globo precisa de algún mecanismo para disiparlo. ¡Sin él, quizás nuestro planeta se hincharía de veras como un globo aerostático calentado por un mechero! Se llega, pues, a una explicación termodinámica de la configuración activa del planeta. Ahora bien, esta explicación reduce el modelo de la Tectónica de Placas a un caso sencillo de estructura disipativa

³⁷ Ver DAVIES, G. F., «On the emergence of plate tectonics», en *Geology* (20), 1992, pp. 963-966.

³⁸ Ver, p. ej., ANGUITA, F., «La evolución de la Tectónica de Placas: el nuevo interior de la Tierra», en *Enseñanza de las CC. de la Tierra* (3.3), 1996.

holísticamente instalada, a un caso más de aplicación de la célebre teorización de Prigogine referente al nacimiento, por causas termodinámicas, de los sistemas autoorganizados.

3. Para que los procesos mecánicos implicados en la dinámica de las placas puedan llevarse a cabo, tienen que satisfacerse ciertas condiciones físicas: no sólo hace falta un flujo geotérmico lo suficientemente intenso, sino que además los materiales subsuperficiales tienen que tener la consistencia adecuada para poder fluir y para que sea posible la subducción. De modo que una tectónica de placas sería imposible tanto en un planeta interiormente frío y rígido (es el caso de los demasiado pequeños, como la Luna) como en uno totalmente deshidratado, como la misma Luna y el tórrido Venus. Y es que actualmente se piensa que la presencia de *agua líquida* es un factor que posibilita la subducción, debido al cambio de consistencia y a la disminución de índice de rozamiento que origina en los materiales³⁹. No puede descartarse que otro líquido de propiedades físicas similares⁴⁰ pueda jugar el mismo papel, pero en todo caso un proceso como el de la subducción parece necesitar un lubricante.

5.1. Viajando al interior de la Tierra

En vida de Wegener, el debate de la deriva continental estuvo focalizado en exclusiva sobre la superficie terrestre. En él se contrapusieron diferentes teorías sobre lo que pasa con «la piel» del globo, y se barajaron múltiples pruebas y contrapruebas en apoyo de las distintas alternativas, pero se echó siempre en falta una hipótesis «de profundidad» que propusiera una *causalidad unificadora* del objeto dinámico Tierra,⁴¹ y esa carencia se explicaba por la gran escasez de datos referentes al interior del globo. No es que éste no hubiese sido, desde antiguo, objeto del más vivo interés (recordemos la abigarrada imaginación telúrica de los siglos

³⁹ Ver HIRTH, G. y KOHLSTEDT, D. L., «Water in the oceanic upper mantle: implications for rheology, melt extraction and the evolution of the lithosphere», *Earth Planet. Sci. Lett.* (144), 1996.

⁴⁰ El metano líquido puede cumplir en Titán (satélite de Saturno, de 5.150 km de diámetro) un papel análogo al que el agua cumple en la Tierra.

⁴¹ El propio Wegener, con una mezcla de lucidez y modestia, se dio cuenta de esto cuando dijo: «aún no ha aparecido el Newton de la teoría de los desplazamientos» (*Origen..., op. cit.*, p. 151).

XVII y XVIII), pero las crecientes exigencias de contrastación habían hecho caer en descrédito los modelos especulativos.

El desarrollo de la sismografía de transmisión a partir de 1890 permitió, al fin, asomarse al interior de la Tierra. La posibilidad de ser transmitidas y las variaciones de velocidad de las ondas sísmicas constituyeron el primer criterio fiable para delimitar las grandes unidades verticales o *geosferas internas*. «Corteza», «manto» y «núcleo» pasaron a ser nociones familiares desde el bachillerato.

Sin embargo este esquema sencillo del interior de la Tierra, que es anterior a la tectónica de placas, se ha complicado al dar entrada a los nuevos conocimientos. El modelo se orienta ahora a una globalización de la dinámica terrestre, perfilándose una geología dinámica tridimensional de la que la «tectónica de placas» es sólo un aspecto.

De entrada, las propiedades mecánicas de la corteza y del manto quedan matizadas, y aparecen nuevas unidades. La capa basal de la corteza continental es relativamente dúctil, lo que la convierte en una *capa de despegue* presente entre dos geosferas de elevada rigidez: la parte superficial de la corteza y el manto superior. En cuanto a este último, durante largo tiempo se ha pensado que se encontraba allí la célebre astenósfera, la capa fluyente que permitiría los movimientos intratelúricos, así verticales como horizontales. Sin embargo, esta capa no podría ser ni gruesa ni regular, hasta el punto de que su espesor pasaría de 250 km bajo las dorsales oceánicas, a nulo por debajo de las zonas continentales estables. Dicho en otros términos, la astenósfera no sería una geosfera continua. Pero las corrientes de convección que mueven las placas no podrían funcionar, y ni siquiera existir, en el seno de una astenósfera discontinua. La única explicación es que dichas corrientes existan gracias al comportamiento fluido a muy largo plazo del manto en su conjunto.

La interfase manto-núcleo externo es uno de los niveles más complejos y dinámicos del globo, y su relación con la tectónica de placas instalada en superficie se nos aparece cada vez mayor. Baste con avanzar que se trata de un nivel de espesor variable con una complicada *topografía* intratelúrica y una no menos compleja *tomografía* (descripción zonal de la temperatura), que es al mismo tiempo el nivel base del que parten columnas convectivas ascendentes (los penachos o plumas), origen de

un tipo especial de volcanes como los de Canarias, y al que van a parar residuos fríos de placas subducidas. Esta capa D”, como se la conoce, separa dos geosferas heterogéneas, como lo son el manto inferior, de composición silicatada y densidad próxima a 6 g/cc, y el núcleo externo, de hierro fundido y densidad en torno a 9,5 g/cc. El empuje de Arquímedes impide penetrar en el núcleo externo –por dúctil que sea– a cualquier material duro pero ligero, por mucho que presione, de modo que ahí deben depositarse los residuos sin digerir de la subducción.

Dado que en el interior del núcleo no suele reconocerse más discontinuidad que la que separa el *núcleo externo* fundido del *núcleo interno* sólido, podría suponerse que la complejidad del núcleo es menor que la del manto, y que menores son también, por tanto, los enigmas que esconde, pero no es así. Baste con señalar que todos los modelos que se han propuesto para explicar la génesis del campo magnético terrestre la sitúan en el juego rotacional entre los dos núcleos.

5.2. La estructura disipativa geotectónica y sus implicaciones

¿Se seguirá hablando dentro de unos años de «tectónica de placas»? Parece más plausible que se hable simplemente de *geología global*, ya que la geotectónica mira cada vez más «hacia abajo»... La visión actual del fenómeno de la subducción y de la post-subducción es fascinante: el «tapiz deslizante» de suelo oceánico, frío y cargado de los sedimentos empapados que se han ido depositando sobre él a lo largo de millones de años, se ve forzado a seguir, como los vagones a la locomotora, a la delantera de la placa en su penetración e inmersión profunda en el manto. Este último proceso no es sencillo: bajo la mole continental, de densidad menor que la corteza oceánica, no presenta mayores problemas, pero otra cosa es descender a través del manto, cuya densidad más elevada debería implicar un empuje de Arquímedes positivo, capaz de reflotar la losa oceánica en vías de subducción. Cambios físico-químicos, no del todo bien comprendidos, deben ponerse en juego para permitir la continuidad del proceso. Además, la intensa fricción produce calor, el cual, sumándose a la elevación térmica que es función de la profundidad, desencadena reacciones que originan nuevos productos magmáticos; se trata de los *magmas andesíticos* de composición granítica, que son característicos de las

cadena montañosas de borde continental, como la cordillera andina. Es así como los continentes incrementan su superficie total en el transcurso de los tiempos geológicos, uno de los aspectos más interesantes que prevé la teoría geotectónica.

Las orlas volcánicas que se encuentran sobre las zonas de subducción no sólo eyectan lava: también expulsan a la atmósfera una cantidad ingente de CO₂, aunque dicha cantidad varía en función de diferentes factores, la mayoría ligados a la biosfera. *En nuestro planeta, el ciclo del carbono pasa por la subducción*. O lo que es lo mismo, por la tectónica de placas. He aquí un eslabón que vincula la geotectónica con la concepción geofisiológica conocida como teoría de Gaia.

Aparentemente la tectónica de placas es hoy un rasgo exclusivo de la Tierra en el sistema solar, al igual que lo es la existencia de una biosfera. Por lo que se refiere a la eventualidad de que, en el pasado, Venus o Marte conocieran también regímenes dinámicos de tipo tectónica de placas, sólo cabe decir que no puede descartarse. Sea como fuere, la asombrosa vigencia temporal (¡3000 millones de años, si no más!) de la estructura disipativa global cuyo rasgo más aparente –pero no el único– son las placas móviles, bastaría ya para singularizar a un planeta como el nuestro, que presenta demasiadas y demasiado asombrosas excepcionalidades como para no sospechar que existe un nexo entre ellas.

Referencias bibliográficas

- ANGUITA, F. (2002): *Biografía de la Tierra*. Madrid, Aguilar.
- ANGUITA, F. Y MORENO, F. (1991): *Procesos geológicos internos*. Madrid, Editorial Rueda.
- DALZIEL, I. W. (1995): «La Tierra antes de Pangea», en *Investigación y Ciencia*.
- HALLAM, A. (1989): *De la deriva continental a la tectónica de placas*. Barcelona, Labor.
- MURPHY, J. B. Y NANCE, R. D. (1992): «Las cordilleras de plegamiento y el ciclo supercontinental», en *Investigación y Ciencia*.

ORESQUES, N. Y LE GRAND, H. (2002), eds.: *Plate Tectonics. The Insider's History of the Modern Theory of the Earth*. Westview Press.

TUZO WILSON (director e introductor) (1974): *Deriva continental y tectónica de placas*. Madrid, Blume.

WEGENER, A. (1983): *El origen de los continentes y océanos*. Madrid, Pirámide; trad. de la 4ª edic. (1929) por F. Anguita y J. C. Herguera.