

Isostasia y sismología comienzan a definir una nueva Tierra

En 1914, el geólogo norteamericano Joseph Barrell propuso, para explicar el equilibrio isostático definido por Dutton unos años antes, dividir la Tierra sólida (excluido el núcleo) en dos zonas: una rígida de unos 100 km de grosor, sobre otra plástica y de profundidad indefinida. La Sismología estaba naciendo, por lo que, lógicamente, Barrell no tenía datos numéricos en los que sustentar su propuesta; pero los términos que sugirió para estas dos unidades (litosfera ["esfera de roca"] y astenosfera ["esfera débil"]) han tenido una larga carrera en las Ciencias de la Tierra.

En 1926, el sismólogo alemán Beno Gutenberg halló que en algunas zonas la velocidad de las ondas sísmicas decrecía ligeramente (alrededor de un 5%) entre 100 y 200 km de profundidad, y atribuyó este efecto a una disminución en la rigidez del material en estas áreas. La mayoría de los especialistas, sin embargo, consideró sus pruebas insuficientes: la principal objeción era que la zona de sombra no era totalmente "oscura", sino que contenía diversos ecos sísmicos. Por este motivo, la idea de un nivel de baja velocidad sísmica quedó ignorada hasta los años 60.

En 1962, Don Anderson, un prestigioso geofísico de CalTech, intentó resolver las objeciones anteriores argumentando que el nivel plástico debía ser muy heterogéneo "...realmente este nivel está lleno de heterogeneidades..." (Anderson, 1962, p. 4). Además, presentaba a continuación sus propias pruebas, basadas en los ensayos nucleares subterráneos de los años 50: *"Las explosiones nucleares subterráneas han hecho posible por fin una prueba experimental controlada del análisis de Gutenberg. El tiempo, la energía y la localización de las explosiones se conoce con tal precisión que un solo ensayo proporciona datos de una calidad excelente"...* *"Visto en detalle, el nivel de baja velocidad se extiende desde unos 60 hasta unos 250 km"* (id, p. 4)... *"Estudios recientes de las ondas superficiales en nuestro laboratorio del Instituto de Tecnología de California y en la Universidad de Columbia han demostrado por vez primera que el nivel de baja velocidad está presente tanto bajo los océanos como bajo los continentes"* (id, p. 7)... *"Indican que esta capa es de hecho un fenómeno global"...* *"Este trabajo...demuestra que la zona de baja velocidad es necesaria para explicar las frecuencias observadas"* (id, p. 7).

Y sin embargo, Anderson reconocía a continuación que aún quedaba mucho por explicar: *"La comparación de las trayectorias sísmicas oceánicas con las continentales muestra que las ondas se deceleran más bajo los océanos. Evidentemente, las diferencias geológicas entre las cuencas oceánicas y las masas continentales no están limitadas a la corteza, sino que se extienden a varios cientos de kilómetros de profundidad en el manto"* (id, p. 7). Como veremos en seguida, estas diferencias se han revelado cruciales (la palabra precisa sería fatales) para el concepto de un nivel universal de baja velocidad. ¿Por qué Anderson no suaviza la *necesidad* de su interpretación hasta tener mejores datos? La clave está en las palabras con las que cierra su artículo: *"...la existencia de este nivel plástico hace la idea de la deriva continental mucho más aceptable de lo que había parecido hasta ahora"* (id, p. 9). Sin duda una razón interesante, pero que revela un sesgo incompatible con la neutralidad que hay que esperar de los científicos, que deberían dejar que los datos hablasen, en vez de dejarse influir por sus teorías favoritas.

Es importante subrayar que en este momento (principios de los años 60, y con la ruptura movilista flotando ya en el ambiente [1953, paleomagnetismo; 1954, sismicidad profunda en planos inclinados]), la vieja astenosfera de Barrell y el nuevo nivel de baja velocidad sísmica de Anderson eran dos conceptos bien diferenciados, y que sólo al calor de la revolución se fundieron en uno solo. Algunos efectos de la confusión que ha seguido están aún impresos en muchos libros de texto.

Los sismólogos siguieron buscando el nivel universal de baja velocidad sísmica a lo largo de toda la década de los 60. Los párrafos siguientes, tomados de Hales y Bloch (1969), demuestran que la empresa no era nada sencilla: *"De modo que parece que, por los datos de ondas de superficie, debería haber un nivel universal de baja velocidad de las ondas P. Es posible que no se observe porque se marque en el segmento final de la curva de tiempos de*

viaje señalada PQ en la figura 2. La otra posibilidad que hay que considerar es que las capas de baja velocidad en las áreas cratónicas sean muy finas y escapen a la detección por ese motivo” (Hales y Bloch, 1969, p. 932). Los subrayados son nuestros, y entre ellos queremos destacar el debería haber, porque creemos que refleja un intento subliminal de forzar los datos de forma que encajen con una hipótesis de trabajo que por entonces se había convertido en teoría *necesaria*.

Esta deformación de la realidad llega a su colmo poco después. En 1972, y en la prestigiosa revista *Tectonophysics*, el geofísico norteamericano Anton Hales llega a escribir: “Sin embargo, me arriesgo a pronosticar que los estudios subsiguientes mostrarán que la zona de baja velocidad es un rasgo general y necesario del manto superior”. (Hales, 1972, p. 476)]. Una afirmación nacida, sin duda, de la desesperación. Y una apuesta perdida: en 1981, el mismo Hales escribe en un tono desencantado: “No está claro en absoluto si existe una zona de baja velocidad debajo de las regiones cratónicas o de plataforma [zonas continentales menos antiguas], o en todo caso a qué profundidad estaría situada, y por tanto a qué profundidad los continentes se deslizan sobre el manto”. (Hales, 1981, p. 1).

Protomártires, revolucionarios y disidentes

Los historiadores de la ciencia han subrayado ya que Francis Bacon no es un predecesor de Alfred Wegener, sino que se limitó a apuntar algunas elucubraciones sobre la forma de los continentes. Entre los precedentes no científicos del moviismo quizá merezca la pena citar a Giordano Bruno, quien entre otras herejías más peligrosas para su integridad física defendía que las posiciones de tierras y mares habían cambiado muchas veces. En 1858 el francés Snider cita la fragmentación de un gran continente como origen de los actuales, y el moviismo nace como una hipótesis científica que cuenta con defensores esporádicos aunque crecientes en número cuando empieza el siglo xx, incluyendo la escuela francesa de geólogos alpinos encabezada por Bertrand. En cuanto a trabajo teórico, probablemente el predecesor más importante de Wegener sea Frank Taylor, americano, quien a partir de 1910 comienza a buscar una teoría orogénica que se base en los desplazamientos continentales. En 1912, Wegener dicta conferencias y publica dos artículos sobre el origen de los continentes en los que se opone a la teoría de la permanencia de las cuencas oceánicas. Los investigadores de la teoría se preguntan (como hace Totten en 1981) hasta qué punto el meteorólogo alemán estuvo influido por Taylor, ya que en estas publicaciones iniciales lo reconoce de forma explícita, mientras que en *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane* (cuya primera edición apareció en 1915) atribuye la idea a una inspiración personal.

Aunque, sobre todo en Estados Unidos, se habló durante un tiempo de la hipótesis de Taylor-Wegener, el nombre de este último comenzó a destacar hasta ponerse a la cabeza de la escuela moviista, un auténtico tributo a su capacidad de trabajo. Por otra parte, las causas del rechazo mayoritario de sus ideas han sido analizadas exhaustivamente por Hallam (1973, 1975), Jones (1974), Frankel (1976), Stucchi (1979) y Anguita (1982). Aunque las ideas moviistas no eran, como hemos visto, totalmente nuevas, esta vez eran expuestas con tal lujo de detalles que los defensores del *statu quo* científico supieron desde el principio que darle la razón a Wegener equivalía a destruir hasta los cimientos la Geología de principios del siglo XX. Como se dijo en el famoso Simposio de Nueva York (1922): el moviismo significaba olvidar lo aprendido en cerca de un siglo y comenzar de nuevo. Volver a escribir todos los libros.

El que hoy sepamos que los ultraortodoxos estaban equivocados nos hace ver bajo un aspecto muy poco agradable a estos a estos guardianes del templo de la diosa Gea de principios del siglo veinte; sin embargo, deberíamos reconocer que probablemente no se diferenciaban mucho de los integrantes de cualquier comunidad científica en otras especialidades y épocas, incluyendo la actual. En todo caso, el hecho de que Wegener no fuese geólogo no ayudó a la aceptación de sus ideas, y su muerte temprana facilitó la tarea de sus opositores: la escuela moviista siguió siendo durante casi cuatro décadas el refugio de francotiradores científicos, algunos ilustres como Du Toit, Holmes, Carey o Runcorn.

Hacia 1966 la situación comenzó a evolucionar muy rápidamente gracias a la coincidencia, en ese año, de la publicación de varios trabajos clave, entre ellos uno de Vine

sobre la interpretación de las anomalías magnéticas y otro de Sykes que demostró que la hipótesis de Wilson sobre las fallas transformantes era correcta. También es cierto que estos datos venían precedidos de intuiciones como la de Hess (1962) sobre la interpretación de rasgos de los fondos oceánicos, y acompañados por una avalancha de datos oceanográficos y geofísicos (especialmente sísmicos) acumulados en muy poco tiempo. La reconversión de gran parte de la investigación geológica hacia estos dos campos tuvo motivaciones bastante prosaicas. Según Stucchi, el auge moderno de la oceanografía geológica se debió a las previsiones de la Oficina de Investigación Naval de Estados Unidos sobre la evolución económica de los hidrocarburos, según el cual muchos yacimientos submarinos de petróleo pasarían a ser rentables con nuevas tecnologías. También parece claro que los datos sísmicos que relanzaron el moviismo surgieron de la red de sismómetros con la que, en plena guerra fría, se intentaron controlar posibles explosiones nucleares clandestinas.

Geólogos y geofísicos no se preguntaron por el origen de los datos al decidirse masivamente a cambiar de opinión sobre la Tierra. En 1968 los francotiradores eran ya abrumadora mayoría, y los fijistas destacados (Belousov, Meyerhoff, Wesson) quedaban aislados. Se había producido lo que en términos epistemológicos se denomina un «desplazamiento de la teoría dominante». El que una parte importante de las evidencias que abonaban este cambio hubiese sido propuesta ya, sin éxito, por Alfred Wegener medio siglo atrás, ejemplifica con claridad el carácter no inductivo de la Ciencia moderna, al mismo tiempo que sus aspectos sociológicos. Asimismo, interesa destacar que algunas de las objeciones importantes de los últimos fijistas (como la no universalidad de la astenosfera, o el carácter no convectivo de las dorsales) están siendo admitidas por las últimas versiones del moviismo.

Después de la revolución

Más de tres décadas han pasado desde los años de la revolución moviista, y la Nueva Tectónica Global, como pomposamente se denominó este conjunto de ideas, se ha transformado de hipótesis geofísica en una teoría general que afecta a (y explica) casi todos los fenómenos y objetos geológicos, desde la orogénesis a las transgresiones, desde el magmatismo a la distribución de especies fósiles, desde la localización de los yacimientos minerales hasta la historia del planeta. Esto significa que la tectónica de placas se ha convertido en una **teoría de la Tierra**; una teoría que, en sus aspectos fundamentales, ha resistido indemne a sus críticos y que, utilizando la tecnología de la era espacial (satélites y radiotelescopios), se ha convertido en la primera teoría geológica que ha realizado predicciones cuantitativas que han podido ser verificadas (Smith et al., 1990; Ward, 1990). Esta situación no tiene precedentes en las Ciencias de la Tierra, y confiere a la tectónica de placas una importancia histórica, el rango de una construcción científica con un rango comparable al de la teoría copernicana, los Principios de Newton, la teoría atómica, la evolución, la mecánica cuántica o la relatividad. Los científicos del siglo XX (y no sólo los geofísicos y geólogos) pueden decir con orgullo que la tectónica de placas es el más reciente de los grandes hitos en la comprensión de la Naturaleza por el hombre, como figura en un informe de una institución oficial de investigación norteamericana, el *National Research Council*, publicado en 1993.

Al igual que la mayoría de las teorías citadas, la tectónica global ha ido reajustándose, y complicándose, desde su enunciado inicial. Como tantas veces en la historia de la Ciencia, los mayores progresos han venido marcados por la introducción de nuevas tecnologías. Las dos más importantes en Ciencias de la Tierra han sido la prensa de yunque de diamante (que ha permitido reproducir experimentalmente las condiciones del centro de la Tierra) y los omnipresentes ordenadores. Éstos, usando la técnica médica de reconstrucción de la estructura interna de objetos mediante cortes seriados conocida en Ciencias de la Tierra como tomografía sísmica, han obtenido imágenes tridimensionales del manto en las cuales mínimos cambios de velocidad son interpretables como zonas calientes o frías, y en último término como comentes convectivas.

Paralelamente, se han producido en este intervalo mutaciones de fondo en la Ciencia moderna: los intentos de comprender la dinámica de sistemas complejos (como la atmósfera) han llevado hasta la física del caos, utilizada en las últimas ideas sobre el campo magnético; y la aceptación de la frecuencia de los acontecimientos de alta energía ha permitido atrevidas

especulaciones, de corte neocatastrofista, sobre la circulación en el manto: los penachos térmicos gigantes y las avalanchas gravitacionales que alcanzan el núcleo terrestre son hijas tanto de la filosofía como de los datos. Comenzaremos esta revisión con lo que sabemos de estas últimas.

La nueva subducción

La división del manto en superior e inferior está basada sobre todo en la Sismología: en el manto superior se producen focos sísmicos, que están prohibidos en el inferior. En la tectónica de placas clásica, esta interrupción de los seísmos se interpretó como una interrupción de la subducción, solución que pareció satisfactoria mientras se creía que sólo el manto superior estaba en convección. Eran los tiempos en que el moviimiento giraba en torno al concepto de astenosfera. Pero la astenosfera siempre estuvo definida de forma poco coherente: mientras que la capa de baja velocidad sísmica (cuando podía localizarse) terminaba hacia los 250 km, la sismicidad lo hacía a los 670. ¿Qué significaba esto? ¿Dónde se producía realmente la convección, en la astenosfera restringida (capa de baja velocidad) o en la ampliada (nivel sísmico)? Como revelan hoy múltiples estudios de tomografía sísmica (Grand, 1994) la subducción abarca la totalidad del manto terrestre, y por lo tanto la convección (de la cual la subducción es la rama descendente) no tiene nada que ver con la astenosfera, ni ampliada ni restringida. La interrupción de los terremotos por debajo de los 670 km se debe a que ésa es la máxima profundidad que puede alcanzar el olivino (un mineral abundante en el manto) antes de descomponerse en fases minerales más densas a causa de los incrementos de presión y temperatura. Este cambio de fases produce a lo largo de microfisuras llamadas antigrietas (Green, 1994), que se enlazan para formar las fallas responsables de los seísmos profundos.

¿Qué le sucede a la litosfera que subduce más allá de los 670 km? Como el centro de la placa está más frío, esta descomposición del olivino (que depende, como hemos visto, de la temperatura) se retrasa, produciéndose a mayor profundidad en ella que en el resto del manto. Esto significa que la punta de la placa que subduce es menos densa que el manto que la rodea, y equivale a una cierta flotación de esta zona, es decir, a una fuerza que se opone a la subducción. El resultado neto de esta oposición dinámica es un retraso en la continuación de la subducción, o sea el establecimiento de una barrera relativa cuya superación no es fácil. Las huellas de este peaje dinámico (denominado estratificación dinámica) se pueden advertir en la frecuente aparición de segmentos horizontales de placas situadas hacia los 670 km, aparentemente incapaces de continuar subduciendo, hasta que su interior se calienta. Se produce entonces, bruscamente, la transición mineralógica, la placa se densifica en forma igualmente brusca, y cae hasta la base del manto en forma de *cascada subductiva* (Tackley et al., 1993), depositándose sobre el núcleo, al que cubre, de forma discontinua, con el llamado nivel D".

Los nuevos (y gigantescos) penachos térmicos

Algunas extrañas características del campo magnético terrestre están saliendo a la luz recientemente: por ejemplo, la intuición de que pueda haber una periodicidad en los períodos de calma magnética. El más conocido de ellos es el llamado supercórón normal cretácico (un crón es un intervalo de polaridad magnética homogénea), un intervalo de 35 millones de años (entre 118 y 83 Ma) en el que no hubo inversiones de polaridad. Recientemente se ha localizado otro intervalo de unos 50 millones de años sin inversiones: el supercórón invertido Kiaman, entre los períodos Carbonífero y Pérmico, hace unos 300 millones de años. ¿Hay un ritmo de 200 millones de años en los descansos del núcleo? Por desgracia, no tenemos datos adecuados para comprobar la presencia o ausencia de un supercórón hace 500 millones de años. Muy recientemente (Coe, 1993) se ha descubierto que durante el supercórón cretácico la intensidad del campo fue solamente de 25 a 45% de la actual; una anomalía cuya importancia aún no sabemos interpretar. Podemos reconstruir, pero sólo toscamente, la historia del núcleo terrestre.

Era tentador intentar conectar esta historia con la de la litosfera, y esa conexión, todavía discutida, fue establecida en 1991 por el oceanógrafo norteamericano Roger Larson. Además del supercrón magnético, el período Cretácico ostenta las siguientes anomalías geológicas:

Entre 120 y 70 millones de años, la producción de corteza oceánica en las dorsales se incrementó (muy bruscamente) entre 50 y 75%. Y varios grandes relieves volcánicos intraplaca surgieron en el centro del Pacífico, entre ellos la meseta de Ontong-Java y las Montañas Mesopacíficas, que son los dos mayores relieves submarinos intraplaca existentes.

La temperatura media de los océanos aumentó desde unos 16°C hasta 22°C. Este invernadero cretácico podría explicarse por un aumento (de 6 a 8 veces) de la concentración de CO₂ en la atmósfera, que acarrearía un importante efecto invernadero. Este aumento, a su vez, sería consecuencia de la desgasificación acelerada del manto causada por el intenso magmatismo.

El 85% de las reservas conocidas de petróleo se produjeron también durante el supercrón cretácico. La causa sería también el incremento de magmatismo submarino, que liberaría a los océanos gran cantidad de nutrientes (como azufre, fósforo y nitrógeno) que provocarían una explosión en las poblaciones de plancton.

Una transgresión universal de más de 100 metros, causada por el incremento de volumen de las dorsales y otros relieves volcánicos submarinos.

Para Larson, la coincidencia entre el vulcanismo masivo (y sus efectos: producción acelerada de corteza oceánica, transgresión, cambio climático y generación de hidrocarburos) y la calma magnética no es casual. La conexión: un penacho térmico gigante se forma en el nivel D", absorbiendo gran cantidad de calor del núcleo. En el núcleo, esto se traduce en una aceleración de la convección (debida al incremento del gradiente térmico entre el interior del núcleo y su superficie) que impide las inversiones; en el manto, en una aceleración de la convección, y con ella una aceleración de las placas; en superficie, en vulcanismo submarino masivo (en el Océano Pacífico), que a su vez llena los océanos de nutrientes, y la atmósfera de gases de invernadero.

¿Cuál es la causa de estos penachos térmicos gigantescos? Para Kent Condie (2000), hay un encadenamiento entre subducción catastrófica y ascenso de columnas térmicas: cuando una avalancha masiva de litosfera llega al manto libera una cantidad ingente de energía potencial. Este calor se transfiere al nivel D", en el que se genera un enjambre de inestabilidades de Taylor, o sea *gotas* ascendentes de material menos denso, que sólo se funde al llegar a la litosfera, formando puntos calientes. Sin embargo, no todos los científicos están de acuerdo con todos los penachos térmicos, y especialmente con los gigantes. Uno de los convencidos (Courtillet et al., 2003) cree que en este momento no hay ninguna columna térmica gigante activa en la Tierra, y establece una división de los puntos calientes en tres tipos: los primarios, enraizados en la base del manto, los secundarios, derivados de aquéllos; y los terciarios, generados por descompresión (mecánica) de la litosfera (FIGURAS 1 y 2). Los mayores esfuerzos de los geodinámicos actuales se dirigen precisamente a la caracterización de estas evasivas columnas que surcan el manto.

¿Hacia una nueva historia (cíclica) de la Tierra?

Con las últimas ideas de Condie vuelven las teorías cíclicas sobre el comportamiento de la máquina terrestre. Cuando se recopilan las épocas de magmatismo más intenso en la historia del planeta, se advierten tres máximos de desigual importancia centrados en 2.700, 1.900 y 1.200 millones de años (FIGURA 3). Según Condie, se trata de tres momentos de máxima producción de corteza continental, las huellas de la llegada a la base e la litosfera de enjambres masivos de penachos térmicos provocados a su vez por colapsos subductivos gravitacionales. No debe escapar a nuestra atención el hecho de que el primero y mayor de los máximos resuelve uno de los grandes problemas clásicos de la Geología: ¿Por qué la mayoría de la corteza continental surge al final del eón Arcaico? Esta conversión de un planeta oceánico a otro con continentes tuvo sin duda una influencia decisiva en la evolución de la

biosfera. Con lo cual se concreta, al menos en hipótesis, una de las conexiones científicas teóricas más discutidas y potencialmente más revolucionarias del final del siglo XX: la que enlaza en una relación de causa a efecto la actividad geodinámica global con el surgimiento y desarrollo de vida en los cuerpos planetarios.

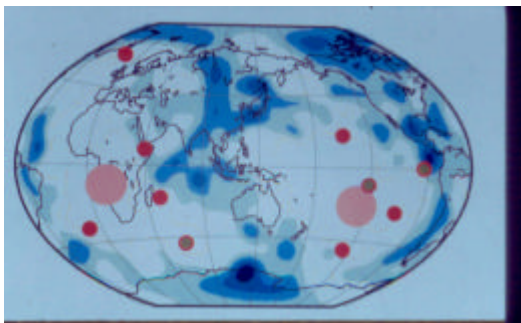


figura 1



figura 2

FIGURAS

1. Distribución de puntos calientes. En rosa, domos térmicos, quizá la huella de antiguos penachos térmicos gigantes. En rojo (verde para los dudosos), penachos térmicos primarios. En Courtillot et al. (2003).
2. Sección idealizada del manto terrestre, con penachos térmicos primarios que surgen del núcleo, otros secundarios derivados de aquéllos; y terciarios, sin raíces térmicas, provocados por la descompresión causada por grandes fracturas de envergadura litosférica. Obsérvese que las dorsales no están térmicamente enraizadas, lo que concuerda con el concepto moderno de que no intervienen en los ciclos convectivos. En Courtillot et al. (2003).
3. Los máximos térmicos en la historia de la Tierra (en Condie, 2000).

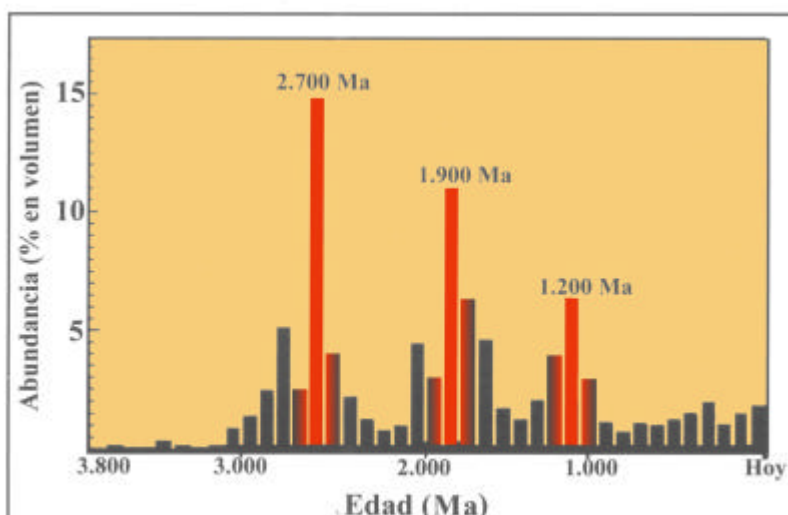


figura 3