

## EL ORIGEN DE LAS MONTAÑAS. II. DE LAS PRIMERAS DEFORMACIONES DE LA SUPERFICIE TERRESTRE A LA TECTÓNICA DE PLACAS.

*The mountain-building. II. From the first deformations of the earth surface to the Plate Tectonics.*

Cándido Manuel García Cruz\*

### RESUMEN

Continuando con la revisión histórica sobre el origen de las montañas, en este artículo se analizan por un lado las primeras ideas que tratan de las deformaciones de la corteza terrestre basadas en los terremotos y la Filosofía Plutonista, y por otro, la Teoría de la Contracción como explicación seminal que se tradujo en diferentes tectónicas globales, finalizando con los modelos de la Tectónica de Placas y la Teoría de la Expansión de la Tierra, como alternativa.

### ABSTRACT

Continuing with the historical review on the mountain-building, in this paper are analyzed on the one hand the first ideas concerning the earth crust deformations based upon the earthquakes, and the Plutonism, and on the other hand the Contraction Theory as a seminal explanation that was translated into various global tectonics, and lastly the models of Plate Tectonics and the Expanding Earth Theory, as an alternative.

**Palabras clave:** Origen de las montañas, historia de la geología, deformaciones corticales, teoría de la contracción, tectónicas globales.

**Keywords:** Mountain-building, history of geology, crust deformations, contraction theory, global tectonics.

### LAS PRIMERAS DEFORMACIONES DE LA SUPERFICIE TERRESTRE

Las ideas que se han visto en la primera parte de este trabajo sobre el origen de las montañas abarcan temporalmente más de veinte siglos, pero esto no significa que en todo ese período, así como en todos los ámbitos culturales, hubiese la misma preocupación en torno a este tema, ni que las explicaciones etiológicas, aunque parecidas, se situaran bajo el mismo marco. El origen de las montañas pasó totalmente *inadvertido*, por ejemplo, en esa gran enciclopedia que fueron las *Etimologías* de Isidoro de Sevilla (560–636), y que constituyen la mayor recopilación del conocimiento de la Alta Edad Media; evidentemente, plantear su génesis, *in illo tempore*, era algo más que superfluo puesto que, sin duda, las montañas habían ido *de la mano del Creador*. Sin embargo, varios siglos antes, diversos pensadores griegos y romanos habían planteado ideas sobre al respecto, dentro incluso de unos presupuestos más racionales que las de otros autores posteriores. Por otro lado, mientras que algunos científicos percibían la topografía desde una perspectiva catastrofista pero con una capacidad observacional mucho mayor que los uniformitaristas, éstos últimos aplicaban el actualismo-uniformitarismo de forma dogmática y a veces hasta irracional. A partir de las últimas décadas del s. XVIII comienza un interés desbordante

te y muy especial por el origen del relieve terrestre que se prolongará durante más de doscientos años, y es precisamente el reconocimiento de la denudación uno de los desencadenantes de esta atracción hacia los paisajes montañosos (Broc, 1969, 2ª parte, caps. I–III). Algunas de las nuevas explicaciones sobre la formación de los montes cohabitan en muchos casos con conjeturas que ya fueron expuestas anteriormente. Se basan en fenómenos geológicos que implicaban deformaciones en la superficie de la tierra, razón por la cual podemos calificarlas como *teorías tectónicas*, aunque bien es cierto que con todas las precauciones posibles, puesto que se trata de ideas en un estado muy elemental y primitivo, y como veremos no todas están sustentadas por la racionalidad.

### Los terremotos, y «otras cosas por el estilo», como causas naturales

A caballo entre los dos primeros milenios de la era común se empiezan a proponer mecanismos en los que subyace una etiología que podríamos considerar como una especie de *historia* para las irregularidades topográficas, entendiendo que éstas no habían existido desde siempre y por ende han debido tener un origen, no relacionado con la creación divina y basado exclusivamente en las *causas natura-*

\* I.E.S. Barranco Las Lajas, c/ Las Abiertas s/n, Agua García, 38355 Tacoronte, Santa Cruz de Tenerife. Miembro de INHIGEO. Correo electrónico: cgarcru@gobiernodecanarias.org.

les. Esta última idea, en esa época, no era nueva ni original: Lucrecio (ca. 99–55 a.C.), en su obra *De la naturaleza de las cosas*, en el s. I a.C., se mostraba ya en contra de la intervención divina en la historia, y negaba que la naturaleza de una *máquina* tan *deficiente, viciosa e imperfecta* como el mundo, hubiera podido ser obra de los dioses (II, 225–230; V, 278–284); en cuanto a la formación de las montañas, Lucrecio sostiene que «la tierra se hundió de repente» abriendo una inmensa grieta en el agua salada donde se extiende actualmente el mar, y debido a la acción repetida de los fuegos del éter y del sol, la tierra se condensó hacia el centro, dando lugar a los campos, en las zonas bajas, y a las montañas, en las zonas empinadas, «porque hundirse las peñas no podían, ni la tierra allanar todas sus partes» (V, 668–689). En esa misma época, Estrabón (ca. 62 a.C.–23 d.C.?) consideraba en su *Geografía* (I, 3, 3) que las sucesivas transformaciones que sufría la tierra se debían al agua, al fuego, a los seísmos, a erupciones volcánicas y a otros fenómenos por el estilo, y también Séneca (4 a.C.–65 d.C.), en sus *Cuestiones Naturales* (VI, 21, 1) defendía que el viento, origen de los terremotos, podía levantar desde abajo nuevas montañas. Esta idea, conocida como *teoría neumática*, se encuentra ya en los *Meteorológicos* (Libro II, caps. 4–8) de Aristóteles (384 a.C.–322 a.C.), y es sin duda el motivo de que tuviera gran predicamento e influyera en muchos pensadores de siglos posteriores.

En la Edad Media, el filósofo Avicena (980–1037) se vale de ellos. Para este pensador persa, fuertemente influido por la filosofía peripatética aunque también poseía ideas originales, existían tres causas básicas como origen del relieve: una primera, que considera *esencial*, se fundamenta en los vientos que ocasionaban los terremotos y que en ciertas partes de la tierra daban lugar a los cerros y las cumbres por deformación del suelo; la otra, que denomina *accidental*, era la erosión provocada por el viento y el agua sobre ciertas partes huecas del terreno que producía depresiones y elevaciones, éstas últimas allí donde no tenía lugar el transporte de materiales dada su naturaleza más resistente; por último, las montañas también se podían originar bajo el mar, por el mismo principio de petrificación que empleaba para las rocas, lo que explicaría la existencia de los fósiles marinos en sus cumbres (Adams, 1938, pp. 333–335; Duhem, 1958, pp. 264–265; Gohau, 1983, p. 13; Ellenberger, 1988, pp. 75–77; Al-Rawi, 2002).

Dentro de la Escolástica cristiana medieval, y consecuentemente también bajo el espectro de Aristóteles, Alberto de Sajonia (1206–1280) defendía ideas similares a las de Avicena que implicaban de alguna manera el levantamiento de las montañas *sobre la esfera del agua* por la acción del viento subterráneo; Alberto Magno incluso realizó una observación interesante dentro de las restricciones del conocimiento geográfico de la época: *las montañas más altas se sitúan en los bordes costeros*, relacionando este emplazamiento con una mayor acción del viento sobre las aguas oceánicas que bloquea-

ban su escape hacia la superficie (Adams, 1938, p. 335; Duhem, 1958, pp. 271–279; Ellenberger, 1988, pp. 80–81). Por otro lado, el monje italiano Restoro d'Arezzo (1239–1282), imbuido en la filosofía aristotélica a través de Avicena, llegó a elaborar una teoría en cierto sentido original sobre la formación de las montañas en su obra *La composición del mundo*. Este intelectual de finales del Medioevo reinterpreta la *Física* de Aristóteles de acuerdo con la doctrina cristiana, y defendía una teoría de la creación continua del mundo natural bajo la influencia del mundo celeste. Las estrellas fijas eran las responsables de la orografía mediante una *virtus caeli* o *virtud celeste*, que Restoro compara con la atracción que ejercía la *calamita* [magnética] sobre el hierro. El término *virtud* hay que interpretarlo en su significado exclusivamente físico de *energía*, de acuerdo con la acepción latina, y carece por ende de cualquier connotación moral. Para Restoro, puesto que en el cielo el número de estrellas es inmenso, su atracción diferencial provoca el levantamiento de una parte de la superficie terrestre en forma de montañas y el hundimiento de otras zonas dando lugar a los valles (D'Arezzo, 1282, II.5.2; Duhem, 1958, pp. 139–142; Tafi, 1991). Esta idea refleja una concepción clave de la Escolástica: la tierra, creada por Dios como morada del hombre, ocupa una *posición central* en el universo y consecuentemente está sometida a la influencia de todos los componentes del cielo.

El poeta Dante Alighieri (1265–1321) también tuvo sus *incursiones* en la filosofía natural bajo la indudable influencia de la citada obra de Restoro, y también de Avicena. Un año antes de su muerte, Dante pronunció una conferencia en Verona que llevaba por título *De situ et figura, sive forma, duorum elementorum, aque videlicet et terre*, más conocida como *Quæstio de aqua et de terra*. En esta pequeña obra, considerada como uno de los mejores ejemplos del pensamiento escolástico medieval sobre geomorfología, el poeta florentino plantea que las montañas han sido levantadas por las *estrellas fijas* del *octavo cielo* (descrito ya con anterioridad en *El Banquete*, Libro II, cap. III), que actúan mediante una *virtus elevans* o *virtud elevadora*, semejante a la acción del imán sobre el hierro, o por vapores que las impulsan desde el interior de la tierra (Alighieri, 1320, XXI). Dentro de esos mismos postulados teológico-científicos, en la *Divina Comedia* Dante también había tratado el *permanentismo* desde su origen para todo lo creado, pero que a su vez estaba sujeto a la *corrupción* (Paraíso, VII, 124–130).

En 1561 aparece en Venecia un pequeño libro que trata exclusivamente sobre el origen de las montañas bajo la forma ya clásica de diálogo: *De montium origine*, de Valerio Faenzi. Este autor, del que prácticamente nada se sabe sobre su vida, consideraba que la tierra no podía ser la causa eficiente de las montañas, y aunque no aporta nada nuevo, sí recoge ideas que ya empiezan a ser familiares entre los estudiosos, y que van desde la conjetura a la racionalidad: los terremotos, la elevación de porcio-

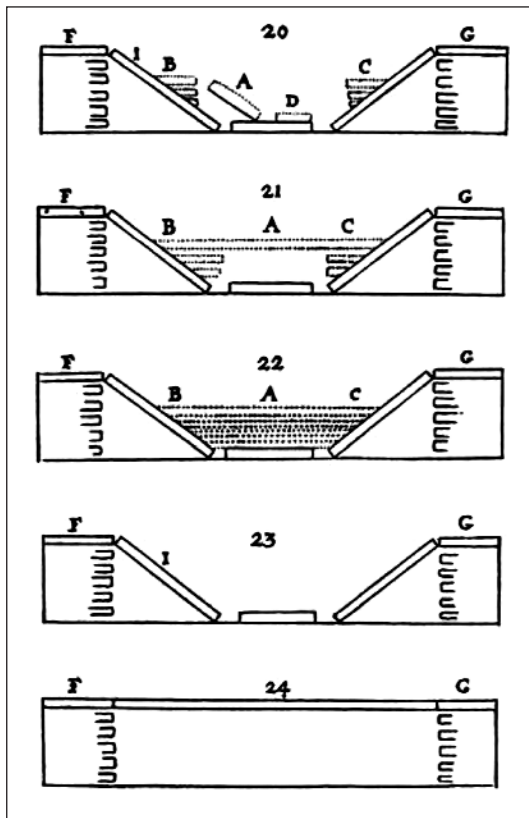


Fig. 1. Construcción de las montañas según Steno (1669, p. 216). [Reconstrucción (de abajo arriba) 25: disposición horizontal original de los estratos en la Toscana; 24: cavidades abiertas por el fuego o el agua; 23: montañas y valles formados por el deterioro de los estratos superiores; 22: nuevos estratos producidos por el mar en los valles; 21: deterioro de los estratos inferiores nuevos y conservación de los superiores; 20: colinas y valles producidos por el deterioro de los estratos superiores arenosos. Las letras representan los materiales en diferentes planos (estratos)].

nes de tierra que han estado mezcladas con el agua, el aire subterráneo, el fuego, el alma de las montañas, las estrellas, la erosión y el viento, la atracción del sol, y el trabajo del hombre (Faenzi, 1561; Adams, 1938, pp. 344–357; Macini y Mesini, 1998).

Un siglo más tarde, el naturalista danés Nicolás Steno publicó una obra titulada *De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus*, que tendría una gran influencia en la metodología geológica (Sequeiros, 2002) y en la tectónica (Pfanenstiel, 1969). Tras una serie de disquisiciones sobre los estratos de la tierra en la que sienta las bases de la moderna estratigrafía (Steno, 1669, pp. 160–167 [pp. 257–259]<sup>1</sup>), se plantea que la causa

principal del origen de las montañas reside en el cambio de lugar en la posición de los estratos (Steno, 1669, pp. 167–169 [pp. 259–261]), y añade los dos posibles modos en que estos cambios pueden producirse:

a) Mediante el hundimiento de algunas zonas de la tierra que ocasionaría el incendio brusco de las exhalaciones subterráneas o una violenta expulsión del aire, y en consecuencia una sacudida ascendente de los estratos.

b) Mediante las grietas que se originan en las capas superiores del terreno cuando se socava la materia que está debajo, y se produce el deslizamiento, hundimiento o desmoronamiento de los estratos superiores.

Para Steno, en estos procesos interviene el fuego subterráneo, y una de las consecuencias que extrae de su estudio es que «todas las montañas que existen hoy no han existido desde el origen de las cosas de este mundo» (p. 168 [p. 260]).

Siglos después, diversos autores, entre ellos el polifacético inglés Robert Hooke (1635–1703), y el religioso y naturalista italiano Anton Lazzaro Moro (1687–1764), retomaron en sus trabajos la idea de los temblores de tierra como origen de las montañas así como de la estratificación de los materiales (Hooke, 1668, pp. 298–299; Drake, 1996, pp. 183–184; Moro, 1740; Adams, 1938, pp. 365–372).

#### Entre el calor interno de la tierra y el principio de uniformidad

La publicación a finales del s. XVIII de la *Theory of the Earth* de James Hutton (1726–1797), abrió una nueva perspectiva en relación con nuestro planeta, en especial sobre la forma de entender su dinámica en oposición directa con la corriente neptunista. En las sucesivas versiones de su teoría geológica (Hutton, 1785, 1788, 1795), el naturalista escocés introduce dos aspectos sobre la *máquina terrestre* que no son del todo originales, pero que van a condicionar un cambio bastante radical en el pensamiento geológico: la acción del calor interno de la tierra como base del *plutonismo*, y la aplicación incondicional del *principio de uniformidad* a los procesos del Globo. Éste último, en forma de una nueva filosofía geológica conocida como actualismo-uniformitarismo, alcanzaría su máxima expresión algunas décadas más tarde con la aparición de los *Principles of Geology* (1830–1833), del también escocés Charles Lyell (1797–1875).

Hutton defendía una transformación cíclica en los materiales terrestres bajo la acción continua y gradual del fuego subterráneo. Por otro lado, ponía en duda que el relieve fuera contemporáneo de la formación del planeta: tanto los continentes como las masas oceánicas eran componentes del sistema terrestre que se intercambiaban a lo largo de un

(1) La paginación entre corchetes de la obra de Steno remite a la traducción castellana del profesor Leandro Sequeiros citada en la bibliografía.

tiempo inconmensurable, y todos los aspectos topográficos estaban inequívocamente relacionados con tres tipos de procesos: la *denudación*, los *movimientos de las masas terrestres* y la *sedimentación*. Llegó a refutar la idea de la clasificación de las montañas, en especial las *primitivas* (Hutton, 1795, vol. I, cap. iv; vol. III, pp. 85–86, 90, 101, 194), básicamente por ser inconsistentes con su teoría, y atendiendo, además, a la existencia en dichas montañas de diversos materiales que se podían reconocer claramente como *secundarios*. Para el científico escocés los estratos se forman y se consolidan en el fondo del océano por la acción del calor interno del planeta, y ese calor es el que provoca el ascenso de los materiales hasta sobresalir por encima del nivel del mar. Esa misma fuerza que produce su elevación es también la responsable de la pérdida de la horizontalidad original de los estratos. Hutton estaba, además, de acuerdo con las ideas que el naturalista suizo Horace-Bénédict de Saussure (1750–1799) expuso en su *Voyages dans les Alpes* sobre la importancia del poder erosivo de la lluvia en relación con la formación de las montañas (Hutton, 1795, vol. II, cap. xi, pp. 391–408; Saussure, 1786, vol. II, pp. 365–366, 512–513).

Los *Principios* de Charles Lyell no abrieron una nueva luz sobre este tema. El autor escocés era partidario de la teoría de las oscilaciones continentales como hitos en la historia del Globo puesto que habían controlado los límites entre los océanos y la tierra firme, y arremetió contra las teorías anteriores que, según él, habían frenado el desarrollo de la geología al estar sustentadas en la filosofía catastrofista (Lyell, 1830, cap. v). Pero las *pruebas* en contra de los procesos graduales y uniformes (en especial todo lo que tenía que ver con la actividad sísmica) en relación con la formación de las montañas eran tan *evidentes* para sus adversarios que, de hecho, Lyell evitó siempre pronunciarse al respecto. Tan sólo reconoció la importancia de la denudación, y de los terremotos y volcanes, en el *modelado posterior* de las cadenas montañosas (Lyell, 1830, pp. 137–141).

## LAS PRIMERAS TECTÓNICAS GLOBALES

Iniciado el s. XIX se van a ir concretando algunos aspectos que constituirían la filosofía geológica oficial durante las décadas siguientes. Entre esos aspectos, por un lado, se produce un serio declive del neptunismo frente a las corrientes plutonista y vulcanista, desechando la vieja idea de un globo como *vaso de precipitado*, aunque como veremos no se abandonó totalmente la Escuela Werneriana. Por otra parte, los científicos de la tierra no se conformaban con considerar, por ejemplo, los terremotos como la causa del origen del relieve. Necesitaban en todo caso, además, explicar cuál era el origen de los movimientos sísmicos, y no bastaba tampoco a ese respecto una etiología recurrente en siglos anteriores como fue el viento o los vapores subterráneos, o el colapso de las cavidades del interior de la tierra.

El naturalista alemán Alexander von Humboldt (1769–1859), neptunista en principio y discípulo de A.G. Werner, con posterioridad y en su obra cumbre *Cosmos* (1845) planteó que el calor central del globo era la fuente principal de los fenómenos geognósticos, y defendía *la reacción que el interior de un planeta ejerce contra sus capas exteriores*. Algunos años más tarde, y tras la publicación de los estudios sobre *dinámica de los terremotos* (1848) del irlandés Robert Mallet (1810–1881), Humboldt cambiaría totalmente de opinión al respecto de sus propias creencias en relación con algunas de las antiguas teorías sísmicas que ya se han comentado y se reafirmaría como vulcanista-plutonista. Pero, sin duda, una de las observaciones más importantes a tener en cuenta fue su afirmación de que esta idea del calor interno había que contemplarla en un *cuadro general* de la Naturaleza (Humboldt, 1845, p. 215), antigua visión holística que, en cierto sentido, la mayoría de los científicos de la tierra había obviado durante siglos.

Para entender el funcionamiento del planeta de esta forma hacía falta una teoría que intentase globalizar todos los fenómenos geológicos, entre ellos el vulcanismo, la sismicidad, y el origen de las montañas. Se rehabilitó así una idea que, a pesar de que no era nueva, sí permitió enmarcar la gran mayoría de los procesos que afectaban a la dinámica del globo: *la contracción terrestre*.

## La Tierra, un planeta en contracción

Durante el s. XVII, algunos autores habían afirmado que la Tierra se había ido encogiendo mientras se solidificaba y endurecía la parte más externa, lo que en gran medida condicionaba la estructura del paisaje. Entre estos autores sobresale René Descartes (1596–1650), quien en sus *Principia Philosophiæ* expone su concepción cosmogónica. La Cuarta Parte de esta obra («De Terrâ») está considerada como la primera *teoría de la tierra*, y es además la primera vez que se alude a la deformación de la superficie terrestre mediante la *inclinación del terreno* como origen de las montañas. Para Descartes (1644, iv.42–44), la Tierra había sido en el pasado una estrella, y se encontraba en proceso de colapso térmico por enfriamiento, lo que afectaría a la organización estructural de sus capas concéntricas. La fragmentación de la corteza sólida externa debido a la contracción sería la responsable de las irregularidades de la superficie terrestre, tanto de las montañas y valles, como de los fondos oceánicos.

Como ya se comentó en la primera parte de este trabajo, tanto Isaac Newton como G.W. Leibniz eran partidarios de la contracción planetaria, pero con un punto de vista distinto: mientras que para el primero la desgasificación explosiva de la Tierra y el consiguiente arrugamiento eran los responsables de la configuración externa del planeta, para el segundo los planetas eran soles apagados, y consecuentemente en proceso de *contracción por enfriamiento*, idea que también defendería G.L.L. Buffon



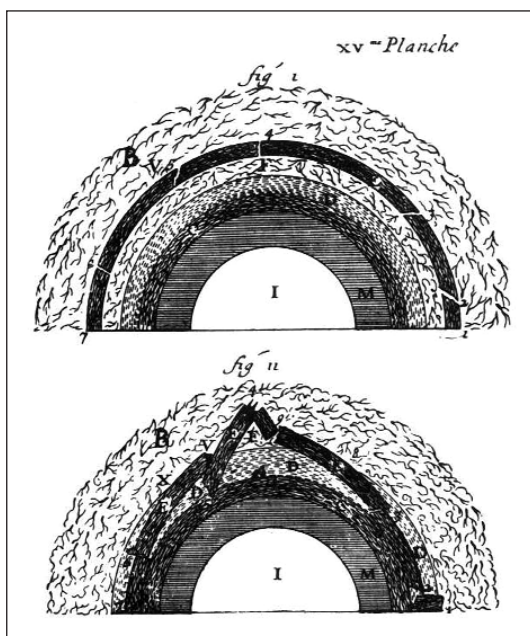


Fig. 2. Irregularidades de la superficie terrestre debido al colapso térmico según Descartes (1644, lámina xv). [fig. i: B y F, aire; D, agua; C, corteza terrestre interior, sólida y pesada; E, corteza menos masiva; I, fuego central; M, capa metálica; fig. ii: formación de montañas, V, por colapso de E y caída sobre C].

(1707–1788) en su *Historia y Teoría de la Tierra* (Buffon, 1749, pp. 147–150), y más tarde en *Las épocas de la naturaleza* (Buffon, 1778, pp. 326–327).

A finales del s. XVIII, el astrónomo francés Jean Sylvain Bailly (1736–1793) efectuó una comparación entre las ideas de Leibniz y las de Buffon en relación con el origen de los planetas, y sostenía que la razón de la existencia de los cuerpos opacos se encontraba en la extinción de los cuerpos luminosos, y por lo tanto, el origen de los planetas era parte de la economía del universo (Bailly, 1779, p. 718). Para este autor, la materia de la que se componen los planetas había formado parte antiguamente de estrellas; en un período posterior, bien por enfriamiento hasta convertirse en sólido y opaco, o por una colisión que dejara escapar un chorro de materia ardiente y líquida, dicha materia se habría endurecido para formar los globos que habitamos, pasando de ser líquida y ardiente a sólida y compacta. La Tierra debería conservar vestigios de ese antiguo estado, que serían precisamente los que permitirían caracterizar su origen (Bailly, 1779, pp. 720–721). De entre estos vestigios, de acuerdo con Buffon, cita el que la tierra esté achatada por los polos, y la existencia de un calor interno en el planeta que se va perdiendo poco a poco, puesto que el

calentamiento solar es insuficiente para evaluar la temperatura del Globo.

Todas estas explicaciones sobre el estado primitivo de la Tierra se desarrollarían pocos años después en la *teoría de la contracción*. Como teoría geológica, la propuesta inicial fue elaborada en 1829–1830 por Léonce Élie de Beaumont (1798–1874), para quien la Tierra debía haber pasado por un estado de incandescencia de acuerdo con la *hipótesis nebular* sobre el origen del Sistema Solar. Consecuentemente, el planeta se habría ido contrayendo conforme se enfriaba a lo largo del tiempo, y la corteza tuvo que adaptarse al acortamiento del radio interno fruto del enfriamiento y solidificación debido al colapso que crean las cuencas oceánicas en medio de los continentes. Lyell (1830, p. 141), aunque inicialmente algo reticente, llegó a ser partidario de la pérdida progresiva de calor por parte del planeta basándose en los cálculos que había realizado al respecto el matemático francés Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768–1830).

La teoría de la contracción como *motor tectónico* implicaba que la liberación de la tensión compresiva en la capa externa durante este colapso térmico era la causa de la actividad tectónica, y se habrían formado así las montañas. En otras palabras, las cadenas montañosas no eran sino *arrugas* en respuesta a un enfriamiento progresivo (modelo de la *manzana arrugada*). Esta teoría sería utilizada en el desarrollo de sus propios modelos planetarios en los años siguientes por diversos geólogos, principalmente el norteamericano James Dwight Dana (1813–1895), el austriaco Eduard Suess (1831–1914), y el suizo Albert Heim (1849–1937), y los geofísicos británicos George Howard Darwin (1845–1912) y Harold Jeffreys (1891–1989), y desembocaría en distintas formas de entender el planeta bajo la perspectiva de una *tectónica global*<sup>2</sup>.

### Primera Tectónica Global: Entre la geometría y los levantamientos

A partir de una interpretación que realiza de *Los meteorológicos* de Aristóteles, el tectonista turco A.M.C. fiengör ha situado el primer intento de tectónica global en el Estagirita, y otro modelo posterior en las ideas de Jean Buridan (1295?1358), pensador medieval francés considerado como el primero en distinguir entre las montañas y las plataformas continentales (fiengör, 2003, pp. 42?45 y 51?52). Aunque no se pretende refutar las opiniones de este geólogo y, además, excelente historiador de su disciplina, así como tampoco negar la importancia y el valor de su reflexión epistemológica, nuestro análisis se remontará tan sólo a la situación de la geología a principios del s. XIX.

Mientras en el Reino Unido tenía lugar un «intenso» debate entre catastrofistas y actualistas–uni-

(2) Véase, además, los trabajos de Greene (1982, cap. 10), Holton y Brush (1976, pp. 421–428), Lees (1953), Meunier (1911, cap. 1, pp. 26?41), Oreskes (1999, caps. 1?2), fiengör (1982a, 2003, pp. 93?98 y 117?121), y Wood (1985, caps. 2?3).

formitaristas sobre cómo se habían producido los cambios geológicos, en la Europa continental, y también en Norteamérica, se prestaba mayor atención al origen de las montañas. El punto de partida de las nuevas explicaciones se iba a asentar en la idea de un planeta en proceso de contracción por enfriamiento, que se manifestaba en superficie a través de la formación de los montes, unas estructuras tectónicas que abarcaban prácticamente la totalidad del Globo. Durante las primeras décadas se empezaron a precisar las observaciones sobre la dirección de las cadenas montañosas, desechándose la antigua idea de que seguían modelos particulares según los meridianos y los paralelos geográficos. Se reafirmaron sobre todo dos ideas esenciales: por un lado, en su gran mayoría las montañas no se generaban como estructuras *aisladas*, sino en forma de *cadenas*, y por otro lado, la *dirección principal* de éstas parecía coincidir con la *mayor dimensión* de las masas terrestres donde se producían, bien se tratase de islas o de continentes (D'Aubuisson des Voisins, 1819, vol. I, p. 101).

Las nuevas explicaciones se caracterizaban por una serie de elementos formales en parte heredados del neptunismo, y en parte basados en la corriente plutonista. La supervivencia de la Escuela Werneriana se percibe en el desarrollo de una *teoría geométrica* para la Tierra, uno de cuyos principales promotores fue L. Élie de Beaumont. Para este influyente geólogo (inicialmente matemático) francés, la disposición de las montañas tenía una base *geométrica* fruto de la mencionada contracción de la esfera terrestre (Élie de Beaumont, 1829, 1850, 1852), a lo que hay que sumar su idea obsesiva de dar una explicación matemática a los fenómenos geológicos. En principio y puesto que él entendía las montañas como estructuras lineales y simétricas, propuso un modelo de *simetría octaédrica*, sustituida posteriormente por una *red pentagonal* basada en el icosaedro. En esta red se acoplaban los sistemas montañosos europeos en las intersecciones de quince anillos que rodeaban la estructura *icosaédrica* de la tierra, cuyo *colapso* había dado lugar a las cadenas montañosas. Precisamente era en esas intersecciones donde se incumplía su modelo, pero él lo achacaba a una ley desconocida (Élie de Beaumont, 1852, vol. I, p. 11).

Algunos años más tarde, el inglés William Lowthian Green (f. 1890) propuso su modelo *tetraédrico* para poder explicar la aparente distribución asimétrica de continentes y océanos en ambos hemisferios debido a una *torsión* de las masas meridionales (Green, 1857, 1875). Esta teoría geométrica, dentro de la unificación entre geografía y geología, fue utilizada también en diversos modelos cartográficos, y perduró hasta las primeras décadas del s. XX<sup>3</sup>.

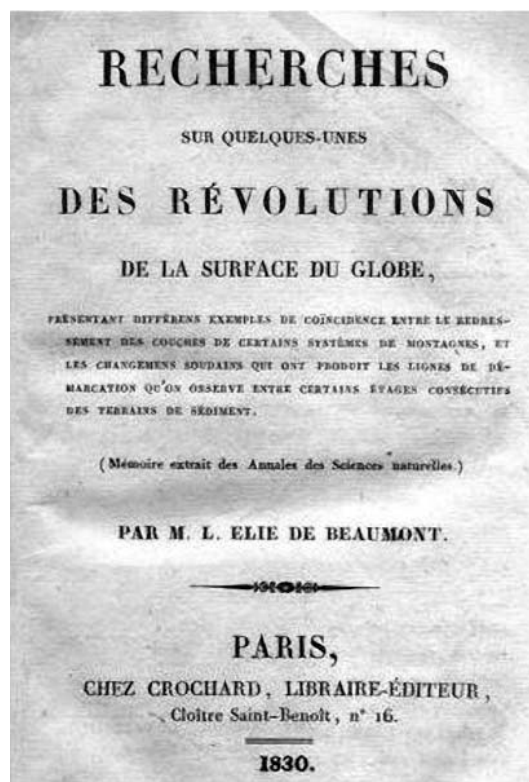


Fig. 3. Primera página de las *Recherches des quelques-unes révolutions sur la surface du globe* de L. Élie de Beaumont (1830).

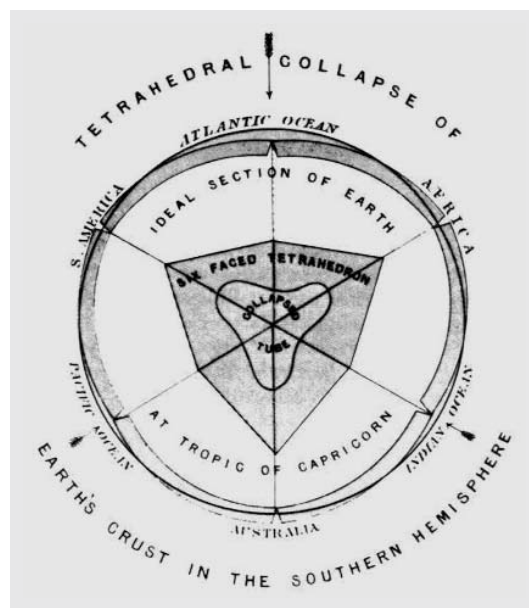


Fig. 4. Colapso tetraédrico de la corteza en el hemisferio sur (Green, 1875).

(3) Véase también Holmes (1965, pp. 17-18), Meunier (1911, cap. IV, pp. 114-128), Oreskes (1999, pp. 13-14), y Wood (1985, pp. 14-23).

Paralelamente al desarrollo del modelo geométrico, pero ahora dentro de la corriente plutonista-vulcanista, el eminente geólogo alemán Leopold von Buch (1774–1853), también discípulo de Werner y en sus primeros años asimismo neptunista, tras sus estudios en las Islas Canarias en 1815, acabó por asumir la existencia de un gran reservorio subterráneo de «lava» que proporcionaba el poder expansivo para el levantamiento de las masas terrestres, siempre bajo una perspectiva catastrofista. Esta idea, conocida como *teoría de los levantamientos*, fue uno de los principales modelos orogénicos del s. XIX. Para Buch era preciso distinguir entre *cráteres de elevación* (montañas) de *cráteres de erupción* (volcanes). En el primer caso, su origen se debía a corrientes gaseosas ascendentes de alta presión procedentes de la materia fundida que existía en el interior de la tierra, y que provocaban el levantamiento de masas horizontales; el escape posterior de dichos vapores producía el colapso de estos materiales que se habían elevado dando lugar a grandes *cráteres* como los que él había observado (en este caso, *calderas*) en las islas de La Palma (Taburiente) o Tenerife (Las Cañadas), y en otras partes del mundo. Por el contrario, un cráter de erupción, es decir, un auténtico volcán, sólo se desarrollaba si existía una *conexión permanente* entre dicho cráter y el reservorio de lava en el interior de la tierra (Buch, 1820, 1825, pp. 258–263, 1836).

Aunque partidario de la contracción, la teoría de los levantamientos fue criticada por Constant Prévost (1787–1856) algunos años más tarde, entre 1839 y 1840, para quien las cadenas montañosas eran consecuencia de la subsidencia que repercutía en un descenso continuado del nivel del mar. Sin embargo, Élie de Beaumont, «hijo espiritual» de Buch, la asoció con las ideas de Georges Cuvier (1769–1832) expuestas en sus *Discours sur les révolutions de la surface du Globe*. De esta forma relacionó la génesis de las montañas con algunos acontecimientos catastróficos (en realidad estaba en contra de las catástrofes *indiscriminadas*) de extinción de las especies que había establecido el ilustre paleontólogo francés y que formaban parte de su visión geológica de la Tierra (Cuvier, 1812, pp. 31–73).

A pesar de que las ideas anteriores constituían una *de las bases más sólidas de la geología moderna*, un problema amenazaba a la teoría de la contracción y consecuentemente a la primera tectónica global: la *isostasia*. Este fenómeno geológico había sido descubierto en el s. XVIII, durante la expedición geodésica hispano-francesa al Perú con objeto de establecer con precisión la longitud del meridiano terrestre y zanjar la controversia sobre la figura de la Tierra. La isostasia explicaba la tendencia al equilibrio de las masas terrestres para contrarrestar de alguna forma la distribución anómala del valor de la gravedad en función de la diversidad topográfica. Una idea aparentemente tan *simple* como ésta ponía en entredicho los principios más elementales

#### **RICHARD OWEN (1810–1890)<sup>4</sup>: la supervivencia del *organicismo global* en el s. XIX**

Personaje versátil, nació en Escocia aunque emigró con su familia a los Estados Unidos; estudió química y geología y fue profesor de ciencias naturales en la Universidad de Indiana. Abandonó el Rectorado de la Purdue University (1874) por su incapacidad para ejercer dicho puesto dado su carácter desorganizado. Con anterioridad había intervenido en conflictos bélicos en México (1846–1848), y en la Guerra Civil norteamericana, donde alcanzó el grado de coronel (1862).

Como geólogo estudió el Lago Superior; en 1857 publicó su *Key to the geology of the globe*, que, según su autor, se trata de «un ensayo diseñado para mostrar que las estructuras geográficas, hidrográficas y geológicas actuales, observadas en la corteza terrestre, fueron el resultado de fuerzas que actúan de acuerdo con leyes fijas y demostrables, análogas a las que gobiernan el desarrollo de los cuerpos orgánicos». El capítulo III (pp. 79–98) lo dedica a la «Geología Anatómica y Fisiológica o Estratigráfica» en el que intenta «demostrar la analogía existente entre las estructuras orgánicas y los estratos geológicos». Después de realizar un examen comparativo entre los Reinos Animal y Vegetal, Owen empieza preguntando al geólogo y al fisiólogo *si no existe una analogía entre la formación de la tierra y de sus habitantes*, y entre esas analogías cabe destacar: El planeta representa un óvulo de la matriz solar, que en su estado primitivo, ígneo y caótico, se asemeja a la estructura amorfa de los óvulos vegetales y del huevo animal antes del desarrollo; la separación de los continentes simboliza la propagación por esquejes o retoños en las plantas, o la reproducción fisipara en animales inferiores; algunos cataclismos primitivos son análogos a la ruptura de las vesículas graafianas, mientras que la convulsión final del diluvio representa la separación de Australia del Continente Occidental, y en la luna, como óvulo terrestre proyectado hacia el espacio, reconoce la dispersión de las semillas o la incubación completa y el parto en los animales.

En relación con las montañas, Owen considera que «la analogía puede ir mucho más allá: el planeta, como el hombre, tiene sus masas montañosas que le dan estabilidad a lo largo y a veces a lo ancho de la tierra firme, de la misma forma que el esqueleto constituye el marco de sujeción de los músculos...» (Owen, 1857, p. 84).

de la teoría de los levantamientos, puesto que ésta última no conseguía explicar la supuesta ordenación de la topografía en ambos hemisferios, ni las anomalías gravimétricas, ni un *hecho* que cada vez cobraba más visos de realidad: la existencia de unas *raíces* en las montañas. Los trabajos que se hicieron en las décadas siguientes sobre la isostasia constituyeron un importante reto para las ideas de Élie de Beaumont, Buch y sus seguidores, y prácticamente fueron abandonadas hacia los años 1880.

(4) No se debería confundir con su homónimo Sir Richard Owen (1804?1892), eminente biólogo y paleontólogo británico, fundador científico del Natural History Museum de Londres.



## Segunda Tectónica Global: James D. Dana vs. Eduard Suess

El abandono de los modelos tectónicos basados en la teoría de los levantamientos se debió, principalmente, a los trabajos de James D. Dana, en Norteamérica, y Eduard Suess, en Europa, tras los cuales se impondría una nueva ortodoxia en relación con la dinámica terrestre fundamentada asimismo en la corriente contraccionista (Dennis, 1982).

Para Dana, la contracción producía las fuerzas capaces de arquear los continentes y levantarlos, dando lugar a los cinturones montañosos; además era responsable, entre otros cataclismos, de las erupciones volcánicas. Dentro de su modelo tectónico, tanto la contracción como el enfriamiento del planeta no habían sido *uniformes* en toda la superficie terrestre: mientras que unas regiones se elevaban, dando lugar a los continentes, otras se hundían, formando las cuencas oceánicas, y además se habían originado en ese orden y por tanto en diferentes etapas del proceso de enfriamiento. La contracción habría continuado incluso después de que la tierra se solidificara, produciendo líneas de debilidad responsables de la configuración de los bordes continentales y de las montañas, entre otros aspectos del paisaje terrestre. La mayor abundancia (y también la mayor altitud) de las masas montañosas en los márgenes continentales que en las zonas del interior se explicaba por una mayor presión en los bordes entre los bloques continentales y las cuencas oceánicas, siendo la tensión lateral más intensa desde éstas últimas hacia el interior de los continentes que en dirección contraria (Dana, 1847, 1863, pp. 716–740, 1875, pp. 744–746). La posible objeción a su teoría en cuanto al problema del origen de las cordilleras en el interior de los continentes estaba resuelta: su modelo sólo se refería a los cinturones montañosos costeros.

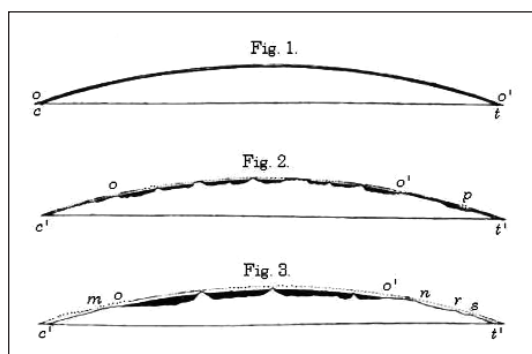


Fig. 5. Origen de las montañas debido a la contracción según Dana (1847). [Fig. 1: ct, corteza original; oo', masa de agua; Fig. 2: c't', corteza contraída; c'o y o't', porciones libres de vulcanismo; p, área acuosa sobre o't'; oo', depresión oceánica incipiente donde la contracción actuará con mayor rapidez y abundará el vulcanismo y los desplazamientos; Fig. 3: m, n, r, s, elevaciones producidas en la corteza por contracción diferencial bajo la depresión oceánica].

Estas explicaciones estaban además relacionadas con otras dos teorías que influyeron decisivamente en el desarrollo posterior de la ciencia geológica: la teoría del *geosinclinal*, por un lado, y la de la *permanencia*, por otro.

En el primer caso, la teoría del geosinclinal fue perfeccionada por Dana a partir de una idea propuesta por James Hall of Albany (1811–1898) en una conferencia impartida en 1857, aunque no se publicó hasta 1882. Un *geosinclinal* (término acuñado en 1875 por Dana) formaba una importante unidad estructural y sedimentaria de la corteza terrestre, situado paralelamente a los márgenes continentales, en el que se acumulaban los depósitos sedimentarios que con posterioridad eran deformados durante la orogénesis. Mediante el geosinclinal se intentaban explicar los fenómenos tectónicos y orogénicos en relación con la evolución de las cuencas sedimentarias. Fue considerado como un concepto *perfectamente establecido* y llegó a constituir uno de los más importantes paradigmas geológicos durante más de un siglo (Dott, 1974, 1979). Prácticamente *sucumbiría* con la Tectónica de Placas, aunque a finales del s. xx aún pervivían algunos conceptos en relación con esta idea (Anguita, 1990; fiengör, 2003, pp. 123?133).

Por otro lado y en conexión con las ideas anteriores, la escuela americana defendía también una *teoría de la permanencia* de los océanos y continentes formulada igualmente por Dana en 1873: estos caracteres, formados en los primeros tiempos de la historia de la Tierra por contracción térmica diferencial, eran figuras permanentes en la superficie terrestre y no intercambiables, razón por la cual estaban constituidos por materiales distintos; sólo de vez en cuando las áreas continentales eran inundadas por el mar, depositándose aquí los sedimentos, de tal forma que los continentes seguían siendo continentes y los océanos permanecían como océanos (Dana, 1873a,b, 1875, pp. 735–756).

En Europa, por el contrario, las explicaciones iban en una dirección algo distinta aunque se basaban asimismo en la contracción. En su monumental obra *Das Antlitz der Erde* (1883–1904), Eduard Suess intentó ofrecer una teoría global para la historia dinámica de la corteza terrestre, estableciendo una relación bastante plausible entre terremotos, fallas, vulcanismo, dislocaciones y fracturas de los sedimentos, así como de otros procesos de origen interno como los metamórficos y los ígneos; en dicho modelo se negaba por otro lado el carácter alternante de los dominios continental y oceánico, pieza clave de la filosofía lyelliana (Durand–Delga y Seidl, 2007). Para Suess, la corteza primitiva de la tierra era *continua*, y su fracturación se había producido como consecuencia del hundimiento de las partes más internas debido al colapso por contracción en respuesta al enfriamiento del planeta: «Presenciamos el hundimiento del Globo terrestre, que comenzó, sin duda, hace mucho tiempo, y la brevedad de la vida humana nos permite presenciarlo con buen ánimo. No es sólo en las altas montañas donde se observan las señales. Grandes macizos se han



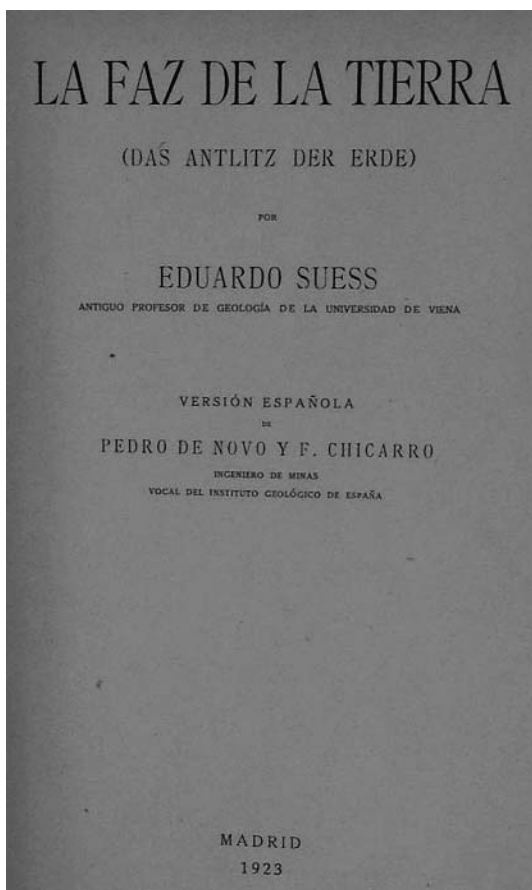


Fig. 6. Primera página de *La Faz de la Tierra* de E. Suess (1ª ed. castellana 1923).

hundido centenares o millares de metros, y no queda en la superficie el menor saliente que indique su situación; sólo la diferencia de naturaleza de las rocas, o bien los azares de la explotación en las minas profundas, revelan, a veces, la existencia de la fractura. El tiempo lo ha nivelado todo<sup>5</sup>» (Suess, 1883, p. 612).

Según el autor austriaco, *las dislocaciones visibles en la corteza terrestre se deben a movimientos resultantes de la disminución del volumen de nuestro planeta* (Suess, 1883, p. 112). Las montañas de la Tierra eran fruto de una serie de dislocaciones que producían las tensiones resultantes, tanto en su componente tangencial como radial, dando lugar, respectivamente, a movimientos corticales *horizontales* (corrimientos y pliegues), y *verticales* (subsistencia), aunque en un primer momento había puesto más énfasis en los desplazamientos horizontales a partir de sus estudios en los Alpes y en oposición casi total con las ideas de Dana (Suess, 1875, p. 25).

(5) Esta última parte, en relación con el tiempo, recuerda la sentencia de Ovidio en las *Metamorfosis* (Libro xv, 234): «Tempus edax rerum» (el tiempo devora todo).

(6) A pesar de lo dicho, la teoría de la contracción ha sido rehabilitada desde finales del s. xx bajo la forma de la tectónica de surcimientos u oscilaciones; véase, por ejemplo, Meyerhoff et al. (1992, 1996), Smoot (2001).

Pero un nuevo *hecho* irrefutable vino a amenazar otra vez a la teoría de la contracción, ahora de la mano principalmente de la geología suiza: la existencia en la región alpina del Glarus de unos plegamientos de grandes dimensiones horizontales (cientos de kilómetros de longitud), descubiertos más tarde también en otras cordilleras, que recibirían la denominación de *mantos de corrimiento*. La única explicación posible era la existencia de un *doble plegamiento* debido a un único empuje en dirección sur-norte, que había originado un cabalgamiento de largo recorrido caracterizado porque tanto los ejes como los flancos de los pliegues eran aproximadamente horizontales (Greene, 1982, cap. 8; Oldroyd, 1996, cap. 8; Trümpy, 1991). Estas ideas eran portadoras de unas implicaciones teóricas importantes: si se aceptaba la teoría de la contracción como explicación de los mantos de corrimiento, se requería una Tierra primigenia de un tamaño *imposible* para poder justificar el acortamiento cortical<sup>6</sup>. De hecho, la teoría de Suess no se ajustaba correctamente con la magnitud aparente de dichos acortamientos, y además era incompatible con el equilibrio isostático y con la permanencia de los fondos oceánicos (Greene, 1982, pp. 269–270; fiengör, 1982b).

Mientras tanto, en Norteamérica se proponían otras soluciones totalmente antagónicas, como por ejemplo la *extensión cortical*, un mecanismo que propiciaba una distribución homogénea de la densidad del interior de la tierra (Le Conte, 1872, 1893), y que en cierta medida fue un adelanto para la modernización de la tectónica (Haller, 1982).

Los estudios sobre geología alpina constituyeron un reto importante para la filosofía geológica del momento, en especial para las explicaciones que se basaban en los modelos contraccionistas; a esto contribuiría además otro factor sustantivo que tuvo una trascendental repercusión en las Ciencias de la Tierra, y también para las Ciencias de la Vida: el descubrimiento de la radiactividad a finales del s. XIX. La suposición de que la descomposición de los materiales radiactivos aportaba una nueva fuente de calor distinto del calor primordial de la Tierra, tenía como consecuencia que el planeta no sólo no se estaba enfriando (contrayendo), sino que, por el contrario, podía estar aumentando su nivel térmico en las capas internas, hecho que podría explicar algunos de los fenómenos que tenían lugar en la corteza terrestre. Los trabajos del irlandés John Joly (1857–1933) y del inglés Arthur Holmes (1890–1965), entre otros autores, fueron fundamentales en este sentido (Joly, 1909, 1925; Holmes, 1915–1925), y la creencia más difundida era que dicho nivel térmico podría haberse mantenido estable durante toda la historia de la Tierra.

Aún se tardaría más de medio siglo en llegar a vislumbrar una luz *más clara* sobre la génesis de las montañas.

## UN CAMINO HACIA LA MODERNIDAD

A caballo entre los siglos XIX y XX, no estaba resuelto de forma convincente el origen de las cadenas montañosas. Algunos autores, a pesar de todas las evidencias en contra, seguían defendiendo la teoría de la contracción liderados por el geofísico inglés Harold Jeffreys, quien nunca aceptó, entre otras cosas, la radiactividad como una fuente secundaria del calor terrestre. Los trabajos experimentales iban encaminados hacia la comprobación de la realidad de los esfuerzos tangenciales como explicaciones causales de las orogenias. Sin embargo, el consenso entre los tectonistas brillaba por su ausencia: ¡En esos primeros años del nuevo siglo se llegaron a contabilizar más de veinte modelos distintos para explicar el origen de las montañas! Todos ellos poseían algo en común: la ausencia de un motor geológico eficaz.

Ese camino hacia la modernidad que han representado las diferentes líneas de investigación en el siglo XX en relación con las Ciencias de la Tierra ha sido tremendamente complejo desde el punto de vista historiográfico. Recogeremos tan sólo algunos ejemplos sobre varias ideas relevantes sin menoscabar otras.

### La deriva de los continentes

Las propuestas más innovadoras y revolucionarias fueron realizadas por un meteorólogo, y las posibles soluciones llegaron de la mano de los geofísicos cincuenta años después. Pero no fueron las únicas, ni en lo que concierne a las propuestas ni a las soluciones.

Entre 1912 y 1929, el meteorólogo alemán Alfred Wegener (1880–1930) propuso la *teoría de la deriva continental*, y aunque no fue el único ni el primero, sí fue el autor que más contribuyó a su desarrollo (García Cruz, 2003). En 1915 apareció la 1ª edición de su obra ya clásica *El origen de los continentes y océanos*, que fue ampliando en los años siguientes hasta 1929, en que se publicó la 4ª y última edición en vida de su autor. En esta obra hace una exposición de sus ideas básicas apoyadas en una ingente cantidad de datos y evidencias, a saber, que los continentes habían formado en el pasado de la tierra una masa única, *Pangea*, cuya fragmentación y posterior separación había dado lugar a la actual distribución de los continentes y océanos.

El movi­lismo geológico tenía una serie de consecuencias más allá de la simple distribución de las masas continentales y oceánicas. Wegener (1929, cap. 2) hizo una seria crítica de las teorías de la contracción y de la permanencia, y en relación con el origen de las montañas realizó los siguientes planteamientos: los bloques continentales (compuestos de sial) se desplazan sobre los fondos oceánicos (constituidos por sima); una serie de procesos provoca en la zona frontal de dichos bloques una compresión y plegamiento contra el sima, como si estuviese actuando un arado, dando lugar a cadenas montañosas como las de la costa

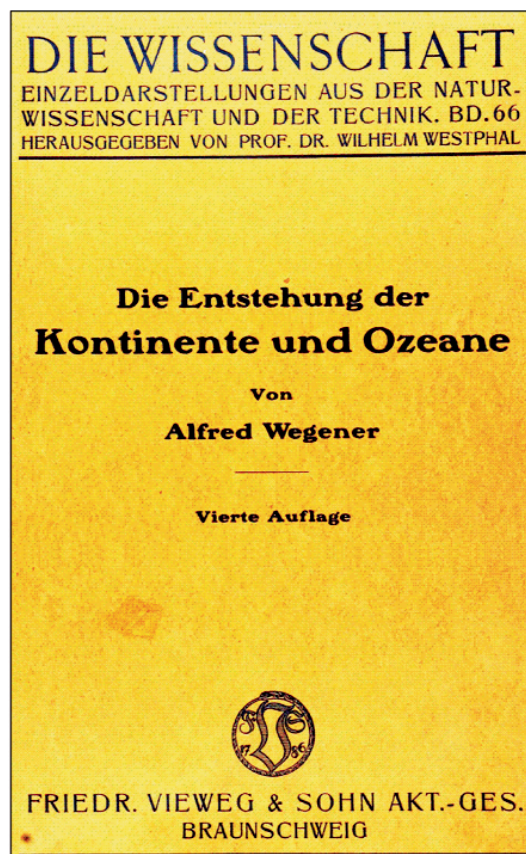


Fig. 7. Portada de *El origen de los continentes y océanos* de Alfred Wegener (1929, 4ª ed. alemana).

pacífica de Sudamérica: «En la migración hacia el Oeste de las dos Américas, su borde anterior se plegó en la gigantesca cadena andina a causa de la resistencia frontal del fondo de la cuenca del Pacífico» (p. 27). Por el contrario, en la zona trasera de los bloques continentales se produce una tracción sobre el sima, interrumpiendo el plegamiento y dando lugar a fallas, desgarres o cadenas montañosas que quedan atrasadas y que posteriormente, al ser arrastradas por los continentes, originan arcos insulares (p. 84). Otras veces es la colisión de los bloques continentales la que provoca el plegamiento, como en el caso de la India contra Asia: «Los enormes pliegues del Himalaya significan la compresión de una parte importante de la corteza terrestre» (p. 80).

Como fuerzas de los desplazamientos (cap. 9) Wegener aducía cuatro causas posibles: la *fuga polar* que empujaría los continentes hacia el ecuador, pero que reconoció como insuficiente para plegar las montañas; dos fuerzas que actúan hacia el oeste, la *fricción de las ondas mareales* que ha hecho rotar toda la corteza, y la *fuerza de precesión* del eje terrestre por la influencia gravitatoria del sol y de la luna; y, finalmente, la *atracción directa* de las masas de sial y sima para reajustar el equilibrio hidrostático fruto de las desviaciones observadas en la forma de la tierra con respecto al elipsoide de revo-

lución. Para el científico alemán, «podemos aceptar algo como seguro: *Las fuerzas que desplazan los continentes son las mismas que producen las grandes cadenas de montañas plegadas*. Desplazamientos continentales, fracturas y compresiones, terremotos, vulcanismo, ciclos transgresivos y deriva polar se encuentran indudablemente conectados causalmente a gran escala» (pp. 160–161; énfasis de Wegener). Esto representa una perspectiva global de la dinámica terrestre, pero desafortunadamente ninguna de las fuerzas a las que recurrió aportaba ese motor tectónico necesario que explicase de forma satisfactoria su teoría. Durante esos años, dos obras fundamentales apoyaron con diferente grado de implicación las ideas de Wegener, y en ambos casos consideraban la compresión horizontal fruto de la movilidad continental el mecanismo más importante para el origen de las cadenas montañosas: *Our mobile earth* (1926), del canadiense Reginald D. Daly (1871–1957), y *Our wandering continents* (1937), del sudafricano Alexander du Toit (1878–1948). Pero una vez más, el principal problema era el origen de la fuerza responsable.

### Entre las corrientes convectivas y la teoría de la undación

Entre las muchas explicaciones posibles que se dieron como motor de la deriva continental y

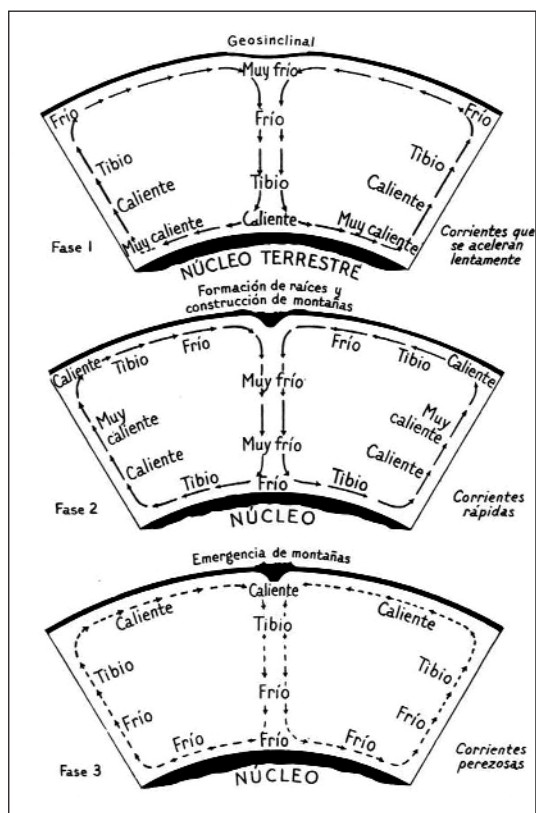


Fig. 8. Formación de las montañas mediante corrientes subcorticales (Holmes, 1965, p. 402, fig. 269).

en relación con el origen de las montañas, sin duda la más importante fue la de la *convección térmica*. Esta teoría supone que bajo la corteza terrestre rígida existe una capa viscosa y homogénea lo suficientemente delgada que permite el movimiento ascendente y descendente de los materiales: las masas más calientes se elevan, se distribuyen por debajo de la corteza, y al enfriarse vuelven a bajar. El fenómeno de la *convección subcortical* había sido sugerido en 1838 por el matemático y geólogo inglés William Hopkins (1793–1866), y algunas décadas después, su compatriota Osmond Fisher (1817–1914) reconoció su importancia en cuanto a sus aplicaciones geológicas, en 1881. Fue el geólogo austriaco Otto Ampferer (1875–1947) quien propuso, en 1906, las *corrientes convectivas o subcorticales* como teoría tectónica, en la que se explicaban numerosos procesos por medio de corrientes convectivas de origen térmico en zonas por debajo de la corteza terrestre. La orogénesis formaba parte de dichos procesos tectónicos definidos por la convección subcortical (Bull, 1921, 1927; Holmes, 1928, 1931, 1933, 1944, 1965; Vening–Meinesz, 1933).

Allí donde las corrientes circulan horizontalmente, debe existir un poderoso arrastre de materiales bajo la corteza provocando tensiones en las zonas de divergencia, y compresión en las de convergencia. En éstas últimas es donde tiene lugar el ciclo orogénico, compuesto de tres etapas asociadas a las correspondientes fases de un ciclo convectivo. Donde se emplazan las corrientes descendentes tiene lugar un largo período de subsidencia del geosinclinal; durante un corto período se forman en esta zona las raíces de las montañas y la compresión orogénica, pero la fuerza descendente impide el equilibrio isostático; por último, se restaura dicho equilibrio mediante el levantamiento gradual como consecuencia de la amortiguación de las corrientes, con lo que finaliza el ciclo. Estos ciclos no serían constantes, sino periódicos, con una disposición diferente de los centros de convección. A la corrientes convectivas contribuirían en las décadas siguientes numerosos autores, y su esencia forma parte de todos los modelos en los que está implicado el movi­lismo continental.

Por otro lado, el geólogo holandés Reinout Willem van Bemmelen (1904–1983) había propuesto en los años 1930 la *teoría de la undación* para explicar el origen de las montañas. Los fundamentos básicos radicaban en la diferenciación geoquímica del manto: durante este proceso, y mediante circuitos convectivos periódicos, se producía el movimiento ascendente o *undación* de masas de menor densidad que se expandían hasta llegar a la base de la corteza, provocando el deslizamiento y posterior plegamiento de las capas sedimentarias para formar las cadenas montañosas (Bemmelen, 1933, 1954). A pesar del escaso reconocimiento que tuvo, esta teoría se incorporaría con algunas modificaciones al movi­lismo geológico.



## La Tectónica de Placas

A principios de la segunda mitad del s. xx la discusión sobre el origen de las montañas aparentemente «todavía no había pasado la etapa especulativa y de controversia» (Holmes, 1965, p. 398); sin embargo, ya en esos años se estaba gestando lo que constituiría uno de los mayores cambios conceptuales en la historia de las ciencias. Los estudios geofísicos, especialmente sobre paleomagnetismo, y los oceanográficos condujeron a una rehabilitación de las ideas de Wegener, y al desarrollo del gran paradigma actual de la Geología: la Tectónica de Placas (Wilson, 1963b, 1968; Morgan, 1968; Dewey, 1972; McKenzie, 1977), que ha dominado en las Ciencias de la Tierra en las últimas décadas con una serie de cambios necesarios e imprescindibles desde sus orígenes (fiengör, 1990; Anguita, 1996).

En este nuevo marco teórico, las montañas están relacionadas, tal como sugería la teoría de la deriva, con los desplazamientos de grandes masas corticales, pero no de los continentes como tales, sino de unidades más complejas, las placas litosféricas, condicionados por los distintos tipos de bordes interplaca. Los procesos orogénicos tienen lugar mediante esfuerzos tangenciales u horizontales, es decir, por mecanismos de compresión. La elevación de las cadenas montañosas se origina por tanto en aquellos límites de placa donde se produce una convergencia y el plegamiento consecuente de los materiales sedimentarios allí depositados.

A principios de los años 1970 se realizaron importantes aportaciones para explicar los procesos orogénicos en términos del nuevo paradigma. Dewey y Bird (1970) clasificaron los orógenos en dos grupos: *orógenos de subducción* y *orógenos de colisión*. En el primer caso, podrían dar lugar a *arcos magmáticos* (Fig. 11a), si la subducción de una placa oceánica se produce bajo otra continental, como en los Andes, y a *arcos insulares* (Fig. 11b), si una placa oceánica subduce bajo otra también oceánica, por ejemplo en las Marianas y Aleutianas; en el segundo caso, las colisiones podrían producirse entre dos continentes (Fig. 11c), caracterizadas por los Alpes y el Himalaya; entre un continente y un arco insular (Fig. 11d), por ejemplo la cordillera Bukit Barisan, en Sumatra; o entre dos arcos insulares (Fig. 11e y f), como Japón–Kuriles. El movimiento

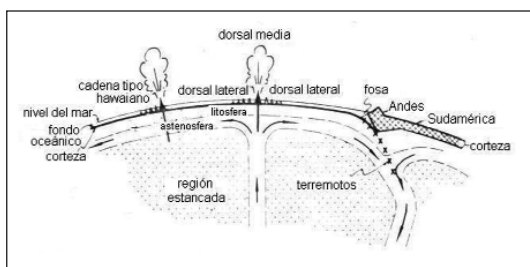


Fig. 9. Esquema de uno de los primeros modelos de la Tectónica de Placas donde se relaciona la convección para explicar diferentes estructuras montañosas (Wilson, 1963b, p. 926, fig. 4).

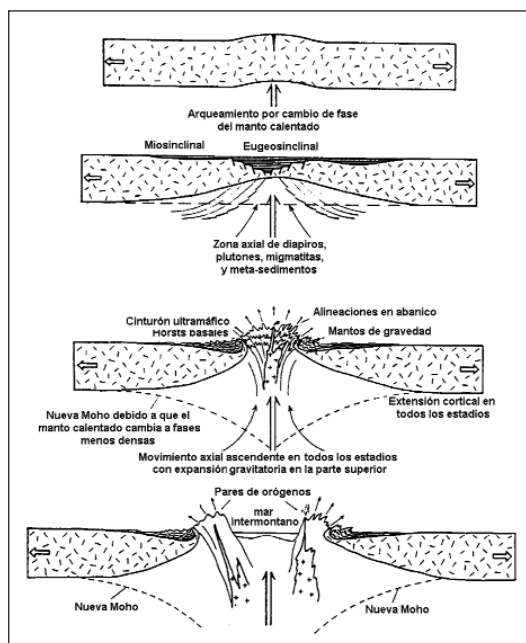


Fig. 10. Clasificación de los tipos de orógenos de acuerdo con la Tectónica de Placas (según Dewey y Bird, 1970, fig. 13).

relativo de las placas en relación con el origen de las montañas sería resaltado también por otros autores (Prothero y Dott, 1971, cap. 7, preferentemente pp. 122–127; Dietz, 1972; Wilson y Burke, 1972; Smith, 1976). Con posterioridad se caracterizaron los *orógenos de acreción continental*, que se forman por la unión de varios fragmentos de distinto origen y que además condicionan el crecimiento de los continentes (Ben–Avraham *et al.*, 1981; Schermer *et al.*, 1984).

En cuanto al origen de las deformaciones tectónicas intraplaca, una parte importante se basa en la controvertida teoría del *punto caliente-penacho de manto* desarrollada por J.T. Wilson (1908–1993) y W.J. Morgan (n. 1935), dos de los padres de la Tectónica de Placas, según la cual el relieve, fundamentalmente volcánico, en el interior de las placas es una consecuencia de la fracturación cortical debido al ascenso de masas de magma procedentes de diferentes profundidades en el manto (Wilson, 1963a; Morgan, 1971; fiengör, 1990, pp. 247–248; Anderson y Natland, 2005).

La Tectónica de Placas explica *adecuadamente* el origen y la dirección de las fuerzas que actúan sobre los depósitos sedimentarios, y por ende el desarrollo de los grandes cinturones orogénicos existentes en la Tierra, integrándolos en el ciclo del supercontinente (Murphy y Nance, 1997), y reconociendo a la erosión y al clima como *procesos constructivos* dentro de la orogénesis (Pinter y Brandon, 1997). Sin embargo, como ya señalara Wilson (1990), la complejidad de la geología ha desafiado la explicación sencilla que supusieron los físicos en un principio. Pero no sólo para los mode-

los orogénicos: el motor de las placas tectónicas continúa siendo, por el momento, un dilema sin solución satisfactoria y se sigue discutiendo entre la *convección del manto* y las *fuerzas gravitacionales* como posibles mecanismos principales. Quizás, y una vez más en geología, la solución deba tener una respuesta *ecléctica*.

### La tierra en expansión: ¿una alternativa a la Tectónica de Placas?

Finalizaremos esta síntesis histórica con un breve resumen sobre lo que es considerado por algunos científicos como *una* de las alternativas<sup>7</sup> a la Tectónica de Placas, a pesar de que la mayoría de los geólogos se aferran a este paradigma como el único válido.

En 1933, el geólogo alemán Ott C. Hilgenberg (1896–1976) había sugerido que la Tierra se había estado expandiendo, con un aumento considerable de su radio, como base de la deriva continental. En una Tierra en expansión, la construcción de montañas se asociaba, en su fase de geosinclinal, con fracturas y depresiones en mares profundos, anomalías isostáticas y vulcanismo andesítico, y en la fase de emergencia se relacionaba con terremotos someros y vulcanismo basáltico, mientras que el plegamiento lo provocaba la presión lateral debida a la intrusión magmática y al deslizamiento gravitatorio de los sedimentos (Egyed, 1960). El geólogo australiano Samuel Warren Carey (1911–2002) desarrolló esta idea hasta convertirla en todo un modelo de tectónica global que incluye el movi­lismo continental (Carey, 1958, 1975, 1994), a lo que ha contribuido un grupo importante de científicos de la tierra<sup>8</sup>. Según el modelo de *Tectónica de Expansión Global* (Carey, 1994, caps. 4 y 7), la corteza terrestre está constituida por *nueve polígonos primarios*, ¡de unos 3.000 km de grosor!, que se cruzan en aquellas zonas que son tectónicamente activas, y que no deberían confundirse con las placas tectónicas puesto que los polígonos están perfectamente definidos hasta el núcleo. La Tierra se expande porque existe una producción continua de materia en su interior, consecuencia de la expansión propia del universo, pero no se consume en las zonas de subducción, que constituyen realmente un *mito*. De esta forma, el radio del planeta ha aumentado a lo largo de su historia geológica (1.700 km en el Arcaico hasta los 6.378 km actuales), y debido a una migración diferencial de la litosfera en relación con el manto, se han producido grandes torsiones globales que han ocasionado la separación de las masas continentales.

Las montañas se forman mediante *diapirismo* (Carey, 1994, cap. 3; Ollier, 2003). La corteza sufre un adelgazamiento en algunos lugares debido a la presión que ejercen las masas inferiores. Sobre es-

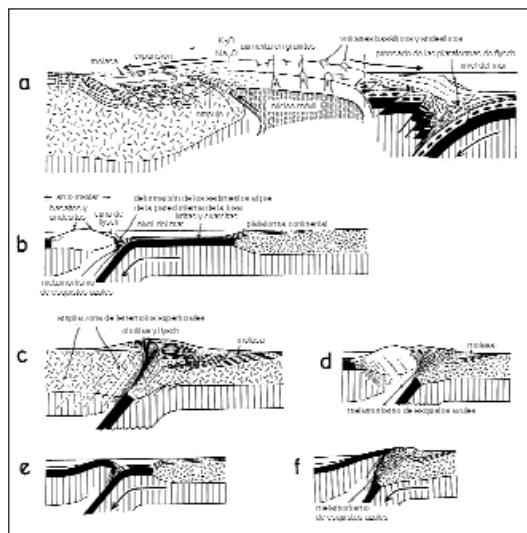


Fig. 11. Orogénesis diapírica según el modelo de tectónica de expansión global (Carey, 1994, cap. 3, fig. 12).

tas zonas, con estructura de fosas oceánicas que se podrían enmarcar en un modelo de geosinclinal, se han acumulado previamente sedimentos. Procedentes del manto pueden ascender materiales calientes por movimientos diapíricos, que penetran en la corteza y a modo de protuberancias hasta llegar a formar las cadenas montañosas. Esta alternativa tectónica tiene serias (y también discutibles) evidencias a su favor.

### EPÍLOGO

En esta revisión histórica sobre el origen de las montañas se han destacado las principales teorías desde la antigüedad hasta el presente, aunque por razones obvias han quedado fuera algunos nombres e ideas de los diferentes períodos históricos. Sin duda, cada una de las distintas teorías merecería un estudio más exhaustivo con un buen respaldo epistemológico, sobre todo para ayudar a comprender a los alumnos, por un lado, cómo ha ido evolucionando el pensamiento geológico en relación con el origen del relieve montañoso, y por otro, para valorar en qué medida la ciencia, como construcción social, está sujeta al *marco ideológico* y a la *imaginación* de sus protagonistas. Esto es posible verificarlo ante la gran diversidad de explicaciones etiológicas que se han considerado y en los diferentes contextos en que éstas han surgido, cohabitando muchas de ellas y compitiendo entre sí en un mismo momento histórico, sin perder de vista que la prevalencia de una teoría, de acuerdo con el físico alemán Max Planck (1858–1947), está más condicionada a la *desaparición*

(7) Además de la tectónica de surgimientos ya mencionada (nota 5), existen otras alternativas que tienen que ver con megacizallas (Strutinski, 1994), y desgarres (Storetvedt, 1997), y que han quedado fuera de esta síntesis.

(8) Para una bibliografía sobre la tectónica de expansión global, véase, por ejemplo, el clásico Carey (1983), y Scalera y Jacob (2003), que incluye recientes estudios tanto geológicos como históricos, y una recopilación bibliográfica digna de agradecimiento.

ción de sus adversarios que a la conversión de éstos hacia una nueva idea (Planck, 1948, p. 38).

No queremos terminar este trabajo sin traer a colación tres fragmentos que pueden ayudar a comprender mejor el interés por los estudios históricos en el campo de las ciencias.

El primero está extraído de la literatura científica del s. XVIII, concretamente de la *Teoría de la Tierra* de James Hutton: «Mientras el hombre aprende, la humanidad debe tener diferentes opiniones. Es prerrogativa del hombre formarse opiniones; de hecho éstas son a menudo, podría decir que por lo general, erróneas; pero se suelen corregir, y de esta forma surge la verdad» (James Hutton, 1795, vol. I, cap. II, p. 250). El segundo es una frase del petrólogo británico Jethro J.H. Teall (1849–1924): «Me parece irrelevante la controversia en cuanto a la certeza o falsedad de una teoría, porque si una teoría dada integra más hechos que cualquier otra, al menos es merecedora de respeto, y provisionalmente puede ser defendida como una hipótesis de trabajo, con la convicción de que no es cierta, o sólo parcialmente». El último corresponde a la biografía del médico alemán Franz Anton Mesmer (1734–1815) que escribió el novelista austriaco Stefan Zweig (1881–1942): «Así como la ola pretende avanzar pasando por encima de sí misma, así también es propio de la tendencia expansiva de toda idea el buscar su forma más acabada. Lo que decide del valor de una idea no es la manera cómo se realiza, sino el grado de realidad que encierra» (Stefan Zweig, 1930, p. 22).

Contribuyamos con un enfoque histórico como éste en relación con el origen de las montañas a que nuestros alumnos se formen opiniones, aprendan a respetar las que no concuerdan con las suyas, permitamos que se equivoquen y ayudemos a que discutan sus errores y los corrijan; así, navegando en el mundo de las ideas podrán alzarse sobre las olas y distinguir mejor la realidad de este fascinante Planeta Tierra.

## BIBLIOGRAFÍA

- Adams, F.D. (1938). *The birth and development of the geological science*. Dover, Nueva York (ed. 1954), 506 pp.
- Alighieri, D. (1320). *Disputa sobre el agua y la tierra* (1ª ed. 1508). En: *Obras completas de Dante Alighieri*. BAC, Madrid (trad. castellana 1956, 5ª ed. 1994), pp. 770–790.
- Al-Rawi, M.M. (2002). *The contribution of Ibn Sina (Avicenna) to the development of the Earth Sciences*. Foundation for Science, Technology and Civilisation, Manchester, Publ. 4039, 12 pp.
- Ampferer, O. (1906). Über das Bewegungsbildung von Faltengebirgen. *Jahrbuch der Kaiserlich-königlichen geologischen Reichsanstalt* (Wien), 106, 539–622.
- Anderson, D.L. y Natland, J.H. (2005). A brief history of the plume hypothesis and its competitors: Concept and controversy. En: G.R. Foulger, J.H. Natland, D.C. Presnall y D.L. Anderson (eds.). *Plates, plumes, and paradigms*. Geological Society of America, Special Volume 388, cap. 8, pp. 119–145.
- Anguita, F. (1990). El concepto de geosinclinal tras la revolución moviilista: otro desajuste entre la ciencia actual y la ciencia en el aula. *Enseñanza de las Ciencias*, 8(3), 287–290.
- Anguita, F. (1996). La evolución de la tectónica de placas: El nuevo interior de la tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 3(3), 137–148.
- Aristóteles. *Los meteorológicos*. Alianza, Madrid (trad. castellana 1996), 158 pp.
- Bailly, J.S. (1779). *Histoire de l'Astronomie Moderne*. De Bure, París (ed. 1785), tomo II, 751 pp. [Bibliothèque National de France, París].
- Bemmelen, R.W. van (1933). The undation theory of development of the Earth's crust. *Proceedings of 16th International Geological Congress*, Washington, 2, 965–982.
- Bemmelen, R.W. van (1954). *Mountain building*. M. Nijhoff, La Haya, 177 pp.
- Ben-Avraham, Z., Nur, A., Jones, D. y Cox, A. (1981). Continental accretion: From oceanic plateaus to allochthonous terranes. *Science*, 213(4503), 47–54.
- Broc, N. (1969). *Les montagnes vues par les géographes et les naturalistes de langue française au XVIIIe siècle*. CTHS (Comité des Travaux Historiques et Scientifiques)– Bibliothèque National, París, 298 pp.
- Buch, L. von (1820). Über die Zusammensetzung der basaltischen Inseln und über Erhebungs-Kratere. *Abhandlungen der physikalischen Klasse der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin aus den Jahren 1818–1819*, pp. 51–86. [Reimpreso en: J. Ewald, J. Roth y H. Eck (eds.) (1877). *Leopold von Buch's Gesammelte Schriften*. G. Reimer, Berlín, tomo III, pp. 3–19. Existe ed. microfilm en: Readex Microprint, Nueva York (1967)].
- Buch, L. von (1825). *Descripción física de las Islas Canarias*. Ediciones J.A.D.L., La Orotava–Tenerife (trad. castellana 1999, de la 1ª trad. francesa 1836), 263 pp.
- Buch, L. von (1836). On volcanoes and craters of elevation. *Edinburgh New Philosophical Journal*, 21, 189–206.
- Buffon, G.L.L. (1749). Histoire et Théorie de la Terre. En: *Histoire Naturelle, générale et particulière*. Imprimerie Royale, París, tomo I, pp. 65–612 [Bibliothèque National de France, París].
- Buffon, G.L.L. (1778). *Las épocas de la naturaleza*. Alianza, Madrid (trad. castellana 1997), 429 pp.
- Bull, A.J. (1921). A hypothesis of mountain building. *The Geological Magazine*, 58, 364.
- Bull, A.J. (1927). Some aspects of the mountain building problem. *Proceedings of the Geologist's Association*, 38, 145–156.
- Carey, S.W. (1958). The tectonic approach to continental drift. En: S.W. Carey (ed.). *Continental drift. A symposium*. Dept. Geology, University of Tasmania, Hobart, Symposium No. 5, pp. 177–355.
- Carey, S.W. (1975). The expanding earth –An essay review. *Earth-Science Review*, 11(2), 105–143.
- Carey, S.W. (ed.) (1983). *Expanding earth symposium*. Sydney, 10–14 febrero/1981. University of Tasmania, Hobart, 423 pp.
- Carey, S.W. (1994). *Earth, universe, cosmos*. University of Tasmania, Hobart, 204 pp.
- Cuvier, G. (1812). *Discours sur les révolutions de la surface du Globe*. C. Bourgois, París (ed. 1985 de la 3ª ed. francesa 1825), 335 pp.



- Daly, R.A. (1926). *Our mobile earth*. C. Scribner, Nueva York–Londres, 342 pp.
- Dana, J.D. (1847). Geological results of the Earth's contraction in consequence of cooling. *American Journal of Science*, 2<sup>nd</sup> Series, 3, 176–188.
- Dana, J.D. (1863/1875). *Manual of geology: treating of the principles of the science with special reference to American geological history*. T. Bliss–Trübner, Filadelfia–Londres, (1<sup>a</sup>/2<sup>a</sup> ed.) 798/828 pp. [Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid].
- Dana, J.D. (1873a). On the origin of the mountains. *American Journal of Science*, 3<sup>rd</sup> Series, 5, 247–350.
- Dana, J.D. (1873b). On some results of the Earth's contraction from cooling including a discussion of the origin of the mountains and the nature of Earth's interior. *American Journal of Science*, 3<sup>rd</sup> Series, 5, 423–443.
- D'Arezzo, R. (1282). *La composizione del mondo*. Fondazione Pietro Bembo, Parma (ed. 1997), 446 pp.
- D'Aubuisson des Voisins, J.F. (1819). *Traité de géognosie*. F.G. Levrault, Estrasburgo–París, 2 vols., 496 + 655 pp. [Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid].
- Dennis, J.G. (1982). Orthodoxy and creativity in theories of mountain building before 1922. *Geologische Rundschau*, 71(2), 421–426.
- Descartes, R. (1644). *Principes de la Philosophie*. J. Vrin, París (trad. francesa 1904, t. IX–2 de *Oeuvres* de Descartes, publicadas por C. Adams y P. Tannery; ed. 1989), 362 pp. [Existe trad. castellana en Alianza, Madrid (1995)].
- Dewey, J. (1972). Tectónica de Placas. En: J.T. Wilson (ed.). *Deriva continental y tectónica de placas*. Blume, Madrid (trad. castellana 1974), pp. 180–193.
- Dewey, J.F. y Bird, J.M. (1970). Mountain belts and the new global tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 75(14), 2625–2647.
- Dietz, R.S. (1972). Geosinclinales, montañas y formación de continentes. En: J.T. Wilson (ed.). *Deriva continental y tectónica de placas*. Blume, Madrid (trad. castellana 1974), pp. 168–178.
- Dott, R.H., Jr. (1974). The geosynclinal concept. En: R.H. Dott, Jr. y R.H. Shaver (eds). *Modern and Ancient Geosynclinal Sedimentation*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 19, pp. 1–13.
- Dott, R.H., Jr. (1979). The Geosyncline. First major geological concept “Made in America”. En: C.J. Schneer (ed.). *Two hundred years of Geology in America*. University Press of New Hampshire, Hanover (N.H.), pp. 239–264.
- Drake, E.T. (1996). *Restless genius. Robert Hooke and his earthly thoughts*. Oxford University Press, Nueva York–Oxford, 386 pp.
- Duhem, P. (1958). *Le système du monde. Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*. Herman, París, tomo IX (reed. 1997), 442 pp.
- Durand–Delga, M. y Seidl, J. (2007). Eduard Suess (1831–1914) et sa fresque mondiale *La face de la Terre*, deuxième tentative de tectonique globale. *Comptes Rendus Géosciences*, 339(1), 85–99.
- Egyed, L. (1960). On the mechanism of mountain building and folding. *Geologische Rundschau*, 50(1), 225–234.
- Élie de Beaumont, L. (1829). Faits pour servir à l'histoire des montagnes de l'Oisans. *Mémoires de la Société d'Histoire Naturelle de Paris*, V, 1–32.
- Élie de Beaumont, L. (1830). *Recherches sur quelques-unes des Révolutions de la surface du globe*. Crochard, París, 101 pp. [Bibliothèque National de France, París].
- Élie de Beaumont, L. (1850). Note sur la corrélation des directions des différents systèmes de montagnes. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 31, 325–338.
- Élie de Beaumont, L. (1852). *Notice sur les Systèmes de Montagnes*. G. Bertrand, París, 3 vols., 1.543 pp. [Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid].
- Ellenberger, F. (1988). *Historia de la geología*. Vol. 1: *De la antigüedad al siglo XVII*. Labor–MEC, Barcelona (trad. castellana 1989), 282 pp.
- Estrabón. *Geografía*. Gredos, Madrid (trad. castellana 1991), vol. I (Lib. I–II), 559 pp.
- Faenzi, V. (1561). *De montium origine/Sull'origine delle montagne*. Tararà, Vernania (ed. bilingüe latín/italiano 2006), 178 pp.
- Fisher, O. (1881). *Physics of the Earth's crust*. Macmillan, Londres, 299 pp. [British Library, Londres].
- García Cruz, C.M. (2003). Más allá de la geografía especulativa: Orígenes de la deriva continental. *Llull, Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*, 26, 121–145.
- Gohau, G. (1983). Idées anciennes sur la formation des montagnes. *Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences, Nouv. Sér.*, n° 7.
- Green, W.L. (1857). The cause of the pyramidal form of the outline of the southern extremities of the great continents and peninsulas of the globe. *Edinburgh New Philosophical Journal*, 6, 61–78.
- Green, W.L. (1875). *Vestiges of the molten globe*. E. Stanford, Londres, 59 pp. [British Library, Londres].
- Greene, M.T. (1982). *Geology in the nineteenth century: Changing views of a changing world*. Cornell University Press, Ithaca, 324 pp.
- Haller, J. (1982). Heretical views on mountain building in Europe and North America: Harbingers of modern tectonics. *Geologische Rundschau*, 71(2), 427–440.
- Holmes, A. (1915–1925). Radioactivity and the earth thermal history. I: The concentration of the radio-active elements in the Earth's crust. *Geological Magazine*, 6, 60–71 (1915); II: Radioactivity and the Earth as a cooling body. *Geological Magazine*, 6, 102–112 (1915); III: Radio-activity and isostasy. *Geological Magazine*, 6, 265–274 (1916); IV: A criticism of Parts I, II and III. *Geological Magazine*, 62, 504–515 (1925); V: The control of geological history by radioactivity. *Geological Magazine*, 62, 529–544 (1925).
- Holmes, A. (1928). Radioactivity and continental drift. *Geological Magazine*, 65, 236–238.
- Holmes, A. (1931). Radioactivity and earth movements. *Transactions of the Geological Society of Glasgow*, 18 (part 2), 559–606.
- Holmes, A. (1933). The thermal history of the Earth. *Journal of Washington Academy of Sciences*, 23, 169–195.
- Holmes, A. (1944). The machinery of continental drift: the search for a mechanism En: *Principles of Physical geology*. T. Nelson, Nueva York, pp. 505–509. [Repr. en: Cox, A. (1973). *Plate tectonics and geomagnetic reversals*. W.H. Freeman, San Francisco (Ca.), pp. 17–22].
- Holmes, A. (1965). *Geología física*. Omega, Barcelona (trad. castellana 1971), 512 pp.

- Holton, G. y Brush, S.G. (1976). *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Reverté, Barcelona (trad. castellana 1989, 2ª ed.), 851 pp.
- Hooke, R. (1668). A discourse of earthquakes. No. 1 (pp. 279–328). *En: Drake* (1996, pp. 158–218).
- Hopkins, W. (1838). On the state of the interior of the Earth. 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> Memoirs. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London*, Abstracts, 4, 83–84, 115.
- Humboldt, A. von (1845). *Cosmos, ó Ensayo de una descripción física del mundo*. R.R. de Rivera, Madrid (trad. castellana 1851), vol. I, 386 pp. [Facsimile en: Servicio de Publicaciones, Universidad de Córdoba (2005)].
- Hutton, J. (1785). *Abstract of a dissertation concerning the system of the earth, its duration and stability*. Scottish Academic Press, Edimburgo (facsimile 1987), 30 pp. [Existe trad. castellana en: *Llull*, 22(43), 223–238 (1999), y *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 12(2), 153–156 (2004)].
- Hutton, J. (1788). Theory of the Earth, or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution, and restoration of land upon the globe. *Transactions of the Royal Society, Edinburgh*, 1, 209–304. [Existe trad. castellana en *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 12(2), pp. 160–205 (2004)].
- Hutton, J. (1795). *Theory of the Earth, with proofs and illustrations*. Cadell, Jr. & Davies–W. Creech, Londres–Edimburgo; vols. I y II, 620 + 567 pp. [Facsimile en: Hafner, Nueva York (1959), Welson & Codicote, Herts (1959), y J. Cramer, Lehre (1972)]; vol. III, 292 pp. (ed. póstuma de A. Geikie 1899; facsimile en: Geological Society, Londres, 1997).
- Joly, J. (1909). *Radioactivity and geology, an account of the influence of radioactive energy on terrestrial history*. A. Constable, Londres, 287 pp. [British Library, Londres].
- Joly, J. (1925). *Surface History of the Earth*. Oxford University Press, Oxford, 192 pp.
- Le Conte, J. (1872). The theory of the formation of the great features of the Earth's surface. *American Journal of Science*, 104, 345–472.
- Le Conte, J. (1893). Theories of the origin of mountain ranges. *Journal of Geology*, 1, 543–573.
- Lees, G.M. (1953). The evolution of a shrinking earth. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 109, 217–257.
- Lucrecio. *De la naturaleza de las cosas*. Cátedra, Madrid (trad. castellana 1983), 415 pp.
- Lyell, C. (1830). *Principles of Geology*. University of Chicago Press, Chicago (facsimile 1990, de la 1ª ed. inglesa), vol. I, 511 pp.
- Macini, P. y Mesini, E. (1998). Il dialogo sull'origine delle montagne di Valerius Faventius (*De montium origine*, 1561). *Rendiconti dell'Accademia Nazionale delle Scienze, detta dei XL, Memorie di Scienze Fisiche e Naturali*, Serie V, XXII(II), 67–122.
- Mallet, R. (1848). Dynamics of earthquakes. *Transactions of the Royal Irish Academy*, 21, 50–106.
- McKenzie, D.P. (1977). Plate tectonics and its relationship to the evolution of ideas in the geological sciences. *Daedalus*, 106, 97–124.
- Meunier, S. (1911). *L'évolution des théories géologiques*. F. Alcan, París, 364 pp. [Existe trad. castellana en: Librería Gutenberg de José Ruiz, Madrid (1911)].
- Meyerhoff, A.A., Taner, I., Morris, A.E.L., Martin, B.D., Agocs, W.B., y Meyerhoff, H.A. (1992). Surge Tectonics: A new hypothesis of Earth dynamics. *En: S. Chatterjee y N. Horton III* (eds.). *New concepts in global tectonics*. Texas Tech University Press, Lubbock, pp. 309–409.
- Meyerhoff, A.A., Taner, I., Morris, A.E.L., Agocs, W.B., Kamen–Kaye, M., Bhat, M.I., Smoot, N.C. y Choi, D.R. (1996). *Surge Tectonics: A new hypothesis of global geodynamics*. Kluwer, Dordrecht, 348 pp.
- Morgan, W.J. (1968). Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. *Journal of Geophysical Research*, 73(6), 1959–1982.
- Morgan, W.J. (1971). Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 23, 42–43.
- Moro, A.L. (1740). *De crostacei e degli altri marini corpi che si trovano su'monti*. Stefano Monti, Venecia, 452 pp. [Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid].
- Murphy, J.B. y Nance, R.D. (1992). Las cordilleras de plegamiento y el ciclo supercontinental. *Investigación y Ciencia*, 189, 22–30. [Repr. en: *Investigación y Ciencia*, Temas 20, pp. 61–69 (2000)].
- Oldroyd, D. (1996). *Thinking about the Earth: A history of ideas in Geology*. Athlone, Londres, 410 pp.
- Ollier, C.D. (2003). The origin of mountains on an expanding Earth, and other hypotheses. *En: Scalera y Jacob* (2003), pp. 129–160.
- Oreskes, N. (1999). *The rejection of continental drift: Theory and method in American earth science*. Oxford University Press, Oxford, 420 pp.
- Owen, R. (1857). *Key to the geology of the globe*. A.S. Barnes, Nueva York, 263 pp. [British Library, Londres].
- Pfannenstiel, M. (1969). Die Entstehung einiger tektonischer Grundbegriffe. Ein Beitrag zur Geschichte der Geologie. *Geologische Rundschau*, 59(1), 1–36.
- Pinter, N. y Brandon, M.T. (1997). La erosión, constructora de montañas. *Investigación y Ciencia*, 249, 52–58. [Repr. en: *Investigación y Ciencia*, Temas 20, pp. 54–60 (2000)].
- Planck, M. (1948). *Autobiografía científica y últimos escritos*. Nívola, Madrid (trad. castellana 2000), 156 pp.
- Prévost, L.C. (1839–1840). Opinion sur la théorie des soulèvements. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 10, 430 (1839); 11, 183–203 (1840).
- Prothero, D.R. y Dott, R.H., Jr. (1971). *Evolution of the Earth*. McGraw–Hill, Nueva York (7ª ed. 2004), 524 pp.
- Saussure, H.B. de (1786). *Voyages dans les Alpes*. Barde, Manget, Ginebra, vol. 2, 641 pp. [Bibliothèque National de France, París].
- Scalera, G. y Jacob, K.H. (eds.) (2003). *Why expanding Earth?* Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Lautenthaler Montanistisches Colloquium, Mining Industry Museum, Lautenthal, May 26/2001. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma, 465 pp.
- Schermer, E.R., Howell, D.G. y Jones, D.L. (1984). The origin of allochthonous terranes: Perspectives on the growth and shaping of continents. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 12, 107–131.
- Séneca. *Naturales Quaestiones*. CSIC, Madrid (ed. bilingüe latín?castellano 1979), vol. II (Libros IV?VIII), 178 pp.
- Sengör, A.M.C. (1982a). The classical theories of orogenesis. *En: A. Miyashiro, K. Aki y A.M.C. fiengör* (eds.). *Orogeny*. J. Wiley, Chichester (N.Y.), pp. 1–48.

- Sengör, A.M.C. (1982b). Eduard Suess' relations to the Pre-1950 schools of thought in global tectonics. *Geologische Rundschau*, 71(2), 381–420.
- Sengör, A.M.C. (1990). Plate tectonics and orogenic research after 25 years: A Tethyan perspective. *Earth Science Reviews*, 27, 1–201.
- Sengör, A.M.C. (2003). *The large wavelength deformations of the lithosphere: Materials for a history of the evolution of thought from the earliest times to plate tectonics*. Geological Society of America Memoir N° 196, 347 pp.
- Sequeiros, L. (2002). Las raíces de la geología, Nicolás Steno, los estratos y el diluvio universal. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 10(3), 217–242.
- Smith, A.G. (1976). Plate tectonics and orogeny—A review. *Tectonophysics*, 33, 215–285.
- Smoot, N.C. (2001). Earth geodynamic hypotheses updated. *Journal of Scientific Exploration*, 15(3), 465–494.
- Steno, N. (1669). *De solido intra solido naturaliter contento dissertationis prodromus*. En: G. Scherz (ed.) (1969). *Steno: Geological papers*. Odense University Press, Odense, pp. 133–234 (ed. bilingüe latín–inglés). [Existe trad. castellana de Leandro Sequeiros en: *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 10(3), 243–283 (2002)].
- Storetvedt, K.M. (1997). *Our evolving planet. Earth history in a new perspective*. Alma Mater, Bergen, 456 pp.
- Strutinski, C. (1994). An orogenic model consistent with Earth expansion. En: M. Barone y F. Salleri (eds.). *Frontiers of fundamental physics*. Plenum, Nueva York, pp. 287–294.
- Suess, E. (1875). *Die Entstehung der Alpen*. W. Braumüller, Viena, 168 pp. [British Library, Londres].
- Suess, E. (1883). *La Faz de la Tierra (Das Antlitz der Erde)*. R. Velasco, Madrid (trad. castellana 1923), vol. 1, 625 pp.
- Tafi, A. (1991). *Restoro d'Arezzo. Uno scienziato del Duecento*. Badioli, Arezzo, 77 pp.
- Toit, A.L. du (1937). *Our wandering continents*. Oliver & Boyd, Edimburgo, 366 pp.
- Trümpy, R. (1991). The Glarus Nappes: a controversy of a century ago. En: D.W. Müller, J.A. McKenzie y H. Weissert (eds.). *Controversies in Modern Geology*. Academic Press, Londres, cap. 18, pp. 385–404.
- Vening-Meinesz, F.A. (1933). The mechanism of mountain formation in geosynclinal belts. *Proceedings of the Section of Sciences Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen*, 36, 372–377.
- Wegener, A. (1929). *El origen de los continentes y océanos*. Pirámide, Madrid (trad. castellana 1983 de la 4ª ed. alemana), 230 pp.
- Wilson, J.T. (1963a). A possible origin of the Hawaiian Islands. *Canadian Journal of Physics*, 41, 863–870.
- Wilson, J.T. (1963b). Hypothesis of earth's behaviour. *Nature*, 198(4884), 925–929.
- Wilson, J.T. (1968). Static or mobile earth: the current scientific revolution. *American Philosophical Society Proceedings*, 112(5), 309–320.
- Wilson, J.T. (1990). On the building and classification of mountains. *Journal of Geophysical Research*, 95(B5), 6611–6628.
- Wilson, J.T. y Burke, K. (1972). Two types of mountain building. *Nature*, 239, 448–449.
- Wood, R.M. (1985). *The dark side of the earth*. Allen & Unwin, Londres, 246 pp.
- Zweig, S. (1930). *Franz Anton Mesmer*. Apolo, Barcelona (trad. castellana 1938), 125 pp. ■

*Fecha de recepción del original: 9 septiembre 2007.  
Fecha de aceptación definitiva: 31 octubre 2007.*