

Fuente: Pedrinaci, E. (2001): *Los procesos geológicos internos*. Ed. Síntesis. 222 páginas.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LAS IDEAS ACERCA DE LA DINÁMICA TERRESTRE

La visión que cada filósofo, naturalista o geólogo ha tenido de la dinámica interna del Planeta ha estado condicionada no sólo por la teoría sobre la Tierra que sostenía sino por un marco más general que con frecuencia ha incluido creencias religiosas e ideas sobre el origen del hombre y su posición en el universo.

Se han diferenciado tres etapas:

1. La anterior a Lyell: desde la antigüedad clásica hasta comienzos del siglo XIX
2. La comprendida entre Lyell y Wegener: básicamente el siglo XIX
3. Desde la deriva continental hasta la tectónica de placas.

1. Desde la antigüedad clásica hasta Lyell

El nacimiento de la geología como ciencia suele situarse a finales del siglo XVIII, aunque sólo tras la publicación entre 1830-1833 de los "*Principles of Geology*" de Lyell esta ciencia contará con su primera teoría fundamentada y universalmente compartida, lo que se denominaría su primer paradigma. A lo largo del extenso período anterior, que podría llamarse preparadigmático, no son infrecuentes las referencias a distintos procesos para explicar el origen de las montañas: bien por erosión, por descenso del nivel del mar o por levantamiento del terreno. Las más de las veces se trata de explicaciones atectónicas y difusas de las que no están ajenas visiones mitológicas.

Las teorías antiguas sobre el origen de las montañas podemos organizarlas en dos grandes grupos:

- Teorías atectónicas
- Teorías tectónicas

El orden en que se exponen no es estrictamente cronológico, es un orden establecido desde la lógica de la ciencia tal y como hoy se entiende. Aunque puede apreciarse cierta gradación temporal, no se ha elegido el tratamiento cronológico dentro de este extenso período preparadigmático porque se caracteriza por la coexistencia de teorías muy diversas así como por los frecuentes avances y retrocesos. De manera que, por ejemplo, ideas que remiten a la creación para explicar el origen de las montañas pueden encontrarse tanto en el siglo IV como en el XVII; de modo similar, teorías que proponen un origen sedimentario tienen un gran éxito en el siglo XVIII pero también se encuentran referencias en el siglo X.

1.1 Teorías atectónicas

Situamos en este grupo todas aquellas teorías que entre los procesos que ponen en juego para explicar la formación de las montañas no incluyen la deformación de las rocas.

Los grupos se han establecido según consideren que las montañas:

- a) proceden de la creación
- b) se formaron por erosión
- c) se formaron sedimentación

a) *Las montañas proceden de la creación*

La idea de que las montañas que hoy se observan son tan antiguas como la Tierra es, probablemente, la que con más frecuencia puede encontrarse en las primeras descripciones de la naturaleza de las que se tienen referencia. Su presencia puede hallarse en numerosos textos de la edad media y mantuvieron un peso considerable durante los siglos XVI y XVII.

Habitualmente, esta perspectiva forma parte de una visión antropocéntrica y teleológica según la cual la Tierra habría sido creada para servir de residencia al hombre, y condicionó buena parte de las tesis interpretativas de la naturaleza usuales en la edad moderna, de la que no se hallan exentos pensadores tan relevantes como Leibniz, Kepler o Newton. La inmutabilidad de la Tierra vendría a reforzar esta idea y sería, a su vez, reforzada por la visión antropocéntrica.

b) Las montañas se formaron por erosión

Desde la antigüedad clásica son muchos los filósofos y naturalistas que observaron y describieron la acción erosiva de las aguas. Algunos de ellos dieron un paso más, convirtiendo a la erosión diferencial en agente causante de la construcción de las montañas.

Con frecuencia la intervención del agua se relacionaba con el diluvio. No es extraño que así fuese, al margen de la enorme influencia de las ideas religiosas, el diluvio venía a solucionar dos problemas importantes: la presencia de fósiles marinos en las montañas y la necesidad de un proceso, catástrofe, capaz de originar grandes efectos en el escaso tiempo disponible (hasta el siglo XVIII la edad de la Tierra más aceptada era de 6.000 años de antigüedad).

Uno de los intentos más influyentes de hacer compatibles las propuestas científicas con la Biblia se debió a Thomas Burnet, quién en su "*Telluris theoria sacra*" (1684 y 1690) expone la historia de la Tierra. Burnet asume el diluvio como algo incuestionable. Sin embargo admitir una inundación universal que cubriera las cumbres de las montañas más altas, implicaba una cantidad de agua que, según sus cálculos, supondría 8 veces la que existe en los océanos. En consecuencia, si no se quería recurrir a un origen milagroso para el agua, era necesario concluir que la Tierra no tenía montañas. Fue la retirada de las aguas diluvianas la que, al arrastrar muchos materiales, originaría las montañas. Esta perspectiva solucionaba además otro problema: la Tierra, como obra de Dios, debía ser perfecta y las montañas eran unas irregularidades que reducían dicha perfección.

c) Las montañas se formaron por sedimentación

Una idea muy extendida e intuitiva sobre el origen de las montañas es aquella que las relaciona con la sedimentación preferencial en determinados lugares, generalmente marinos. A veces esta idea se hace compatible con una concepción estática del relieve, de manera que se diferencian dos tipos de montañas: las mayores serían tan antiguas como la Tierra (montañas primarias), y las menores se habrían formado con posterioridad (montañas secundarias).

Sin duda el alemán Abraham G. Werner (1749-1817), máxima autoridad de las ideas *neptunistas*, fue el científico más influyente de cuantos han explicado el origen de las montañas como consecuencia de procesos sedimentarios. En su obra más importante "*Kurze Klassifikation und Beschreibung der verschiedenen Gebirgsarten*" no sólo propone una clasificación de las rocas sino que ofrece su modelo histórico de la Tierra en el que inserta la formación de las montañas. Para Werner las aguas del enorme océano primitivo contenían en disolución o suspensión todos los materiales que hoy integran la corteza terrestre. Inicialmente se depositaron los materiales disueltos, dando lugar a lo que llamó rocas primitivas (incluía la mayor parte de las que ahora se clasifican como plutónicas y metamórficas). Poco a poco el nivel de las aguas iría descendiendo, depositándose algunos materiales que estaban en suspensión junto a

otros disueltos. Progresivamente la sedimentación quedaría limitada a los materiales en suspensión. Por último se formarían los sedimentos poco consolidados y las rocas volcánicas (entre las que incluía tobas volcánicas y piroclastos, pero no la mayor parte de los basaltos).

Para Werner los materiales que se encontraban en suspensión o disueltos en el océano primitivo se depositarían de manera desigual generando irregularidades. Por otra parte las fuertes turbulencias que debían existir en el océano primitivo excavarían valles y dejarían otras zonas más altas, las futuras montañas. La presencia de estratos plegados los explicaba considerando que se trataba de materiales de precipitación química y que eso les permitía depositarse siguiendo la forma externa de los relieves sobre los que se situaban.

De esta manera hacía coincidir la formación de pliegues con el depósito. La progresiva retirada de las aguas permitiría emerger las montañas así originadas. Las ideas de Werner tuvieron gran aceptación, protagonizando con Hutton uno de los debates más interesantes de la historia de la geología, el ocurrido entre la escuela neptunista y la vulcanista (Hallam3).

1.2 Teorías tectónicas

Se sitúan en este grupo todas aquellas teorías que entre los procesos que ponen en juego para explicar la formación de las montañas incluyen algún tipo de deformación de las rocas. Se sintetizan a continuación las más importantes agrupándolas según consideren que las montañas:

- se formaron por hundimiento
- fueron levantadas por el calor interno terrestre

a) Las montañas se formaron por hundimiento: el nacimiento de la tectónica

Probablemente la primera interpretación del origen de las montañas como consecuencia de la inclinación de los materiales se deba a Descartes (1596-1650). En 1644 publica los "*Principia Philosophiae*" cuya cuarta parte titula "*De la Tierra*" en la que describe el proceso por el que nuestro planeta adquirió su estructura actual. Para ello seguirá el método que señala en otro lugar de su obra "*deseamos deducir de las causas la explicación de los efectos y no de los efectos la de las causas*".

Para Descartes la Tierra era originariamente como el Sol. En su proceso de enfriamiento experimentó una diferenciación en capas. Una de las claves de su modelo está en la capa E (corteza externa) presentándola como una bóveda inestable, en la que aparecen una serie de grietas o fisuras "*como en verano vemos que se abren en la tierra muchas resquebrajaduras cuando es secada por el Sol*". El hundimiento de dicha bóveda determinará la actual distribución de tierras y mares y originará las montañas.

Su tesis es puramente teórica, no la apoya con observaciones de campo, nada dice acerca de cuestiones entonces tan debatidas como el origen de los fósiles. Tampoco hace referencia a procesos como la erosión o la sedimentación. Podemos decir que es una propuesta muy poco "geológica". Sin embargo construye un modelo terrestre que tendrá gran influencia posterior, en el que además formula lo que probablemente sea la primera teoría tectónica del origen de las montañas.

Unos años más tarde (1669) Steno publica "*El Prodromus*", la obra que para algunos historiadores, como Ellenberger4, merece ser considerada como el texto fundador de la geología. Se trata de un resumen (prodromo) anticipo de lo que iba a ser un tratado que tenía previsto escribir pero que jamás fue publicado (Sequeiros5). Steno no presenta la Tierra en su conjunto, como lo hace Descartes, sino que realiza una descripción a escala local y basada en observaciones de campo de la teoría del basculamiento de las capas terrestres, sus rupturas y hundimientos diferenciales y las

presenta en sentido retrógrado. Considera que la causa principal de la formación de las montañas es *"la situación cambiada de los estratos"* y concluye que *"todas las montañas de hoy no han existido desde el origen de las cosas"*. Esta afirmación es importante tanto por lo que dice como porque se siente en la obligación de decirlo. Aunque quizá lo más elocuente sea la parte final del Prodomus en el que utiliza los principios de horizontalidad original, superposición y continuidad lateral de los estratos, que antes ha descrito, para interpretar las "caras" (historia geológica) de la Toscana. Steno describe los pliegues (*"estratos incurvados"*) aunque no se detiene mucho en ello, como en general ocurre con todas sus observaciones, por algo es un prodromo. Es de resaltar la correspondencia que establece entre los estratos a uno y otro lado de la ladera.

Conviene observar que Steno da un tratamiento indiferenciado al origen de las montañas y los valles. Hasta comienzos del siglo XIX la mayoría de los autores dan la misma explicación (tanto si es tectónica como si es atectónica) para justificar la existencia de valles y montañas. Perspectiva que con frecuencia muestran los estudiantes de secundaria, sobre la que se volverá más adelante.

b) Las montañas fueron levantadas por el calor interno terrestre

El papel clave del calor interno de la Tierra, con frecuencia denominado fuego central, como mecanismo constructor de montañas fue propuesto por Needham a mediados del XVIII y antes que él por Lazzaro Moro. Aunque sin duda la teoría más elaborada, mejor fundamentada y de mayor influencia se debe a uno de los padres de la geología, el escocés James Hutton (1726-1797) quien la expuso en su obra *"Theory of the Earth"*. Se distancia, por un lado, de la frecuente interpretación literal del Génesis y, por otro, de las perspectivas catastrofistas: *"No se invocarán causas que no sean naturales del globo, ni se admitirán procesos cuyos principios desconozcamos, ni se alegarán acontecimientos extraordinarios para explicar hechos comunes"*. Una de sus aportaciones básicas está relacionada con la eliminación del corsé temporal que constreñía la mayor parte de las interpretaciones del pasado terrestre. Hutton propone un modelo dinámico de la Tierra en el que se suceden ciclo tras ciclo la construcción y destrucción del relieve, por lo que no atisba *"huellas del comienzo ni perspectiva de un fin"*.

Parece que sus ideas acerca del enorme poder del calor no son ajenas al descubrimiento de la máquina de vapor. Atribuye al calor interno tres efectos: la consolidación de los sedimentos, la inyección del granito en estado fundido y la elevación de los estratos con la consiguiente formación de las montañas. Destaca por su originalidad y acierto la teoría que sostiene acerca del origen plutónico del granito, aunque sus ideas sobre la diagénesis por la acción del calor son menos acertadas que las que ofrecían los neptunistas.

Para Hutton el poder expansivo del calor interno provoca el levantamiento de los materiales y la formación del relieve. Las montañas así originadas eran erosionadas y los sedimentos transportados al mar, donde se acumularían y compactarían. De nuevo el calor terrestre provocaría el levantamiento del fondo del mar, repitiéndose el ciclo. Él había imaginado que el límite entre un ciclo y el siguiente debería identificarse por la presencia de lo que hoy llamaríamos una discordancia angular y erosiva.

2. De Lyell a Wegener: desarrollo del paradigma fijista

Entre 1830 y 1910 se van a publicar un conjunto de teorías geológicas cuya influencia llegará hasta nuestros días. Entre ellas destacan las tesis uniformistas, la teoría contraccionista y la isostasia, en torno a las cuales se presenta estructurada la síntesis que se hace de las aportaciones de esta época:

- el triunfo del uniformismo

- la Tierra se contrae
- los continentes suben y bajan

2.1 El triunfo del uniformismo

Charles Lyell (1797-1875), considerado el padre "oficial" de la geología, publica entre 1830 y 1833 sus *Principles of Geology*, obra que adquiere una rápida difusión.

Merece la pena presentar el título completo de la obra: "*Principles of geology, being an attempt to explain the former changes of the earth's surface by reference to causes now in operation*" (Principios de geología, que intentan explicar los cambios ocurridos anteriormente sobre la superficie de la Tierra refiriéndolos a las causas que actúan en el momento presente). En ella presenta el modelo de análisis e interpretación de los procesos geológicos conocido como *uniformismo*, caracterizado por la uniformidad (constancia) en el espacio y el tiempo de las leyes físicas que operan en la naturaleza, la uniformidad de los procesos y la uniformidad en el ritmo con que han actuado (gradualismo).

La década que sigue a la publicación de *Principles of Geology* es de una fuerte controversia, sucediéndose argumentos y contraargumentos que acabarán por imponer el sistema uniformista a pesar del "corsé" gradualista que, como criticaba Whewell, imponía.

Después de Lyell la comunidad científica es uniformista. Sin embargo la polémica nunca ha estado completamente cerrada. Durante más de un siglo se ha centrado sobre los límites del gradualismo, a veces demasiado estricto, que imponía el uniformismo. En realidad ya el propio Lyell suavizó su radicalismo inicial.

En lo que respecta a la formación de las montañas, Lyell no pareció estar nunca demasiado preocupado por dar alguna explicación. Su interés se centraba en que no se recurriese a procesos catastróficos para explicarla. Comparó la formación de las cadenas montañosas con el levantamiento isostático de la península Escandinava. Para explicar este levantamiento tuvo que recurrir al calentamiento de la corteza, debe tenerse en cuenta que la teoría de la isostasia no será publicada hasta 1855. Esta misma fuerza, según Lyell, provocaría dilataciones en los estratos capaces de generar presiones laterales que explicasen los plegamientos. Su colega Murchison consideraba que esfuerzos de esta índole eran insuficientes para justificar lo que observaba en los Alpes.

2.2 La Tierra se contrae

El francés Elie de Beaumont propuso en 1829 *la teoría de la contracción*, que desarrollaría con más profundidad en un trabajo publicado 25 años después. Su propuesta se basaba en las ideas defendidas por Buffon de una Tierra originalmente fundida que, lenta pero inexorablemente, iba perdiendo calor. El enfriamiento provocaría una pérdida de volumen, de manera que la corteza inicial, formada cuando todo el interior estaba fundido y por tanto dilatado, se adaptaría a ese interior de menor volumen replegándose. Los pliegues constituirían las montañas.

También a mediados del XIX, James D. Dana defendió con entusiasmo la teoría contraccionista. Consideraba que los continentes correspondían a las zonas de la corteza que primero se enfriaron, contracciones posteriores provocarían los hundimientos de la corteza que ocupa los océanos. Al reducir su volumen el interior terrestre, los continentes sufrirían enormes presiones cuya consecuencia sería la formación de las cordilleras "*como las arrugas que se originan en la piel de una manzana al secarse*".

La teoría de la contracción recibió un enorme impulso del austriaco Eduard Suess, que publicó entre 1883 y 1909 una obra enciclopédica "*La faz de la Tierra*" en la que recopilaba todo el saber geológico de la época. Para Suess la Tierra estaba

estratificada en tres capas: la corteza superior, el manto intermedio y el núcleo central. Grandes bloques de la corteza original habrían ido hundiéndose a medida que se enfriaba el interior terrestre, originándose así las cuencas oceánicas: "*La corteza de la Tierra cede, cae y la cubre el mar. En la historia de los mares es donde descubrimos la historia de los continentes*". El enfriamiento de la Tierra generaría una tensión entre la corteza y el interior del planeta, que sería la causa de dos tipos de presiones: unas paralelas a la superficie (tangenciales) que plegarían los materiales y formarían las montañas. Las otras serían radiales y causarían los hundimientos. Para Suess "*asistimos al hundimiento del globo terrestre*". Introdujo el término eustático para referirse a los movimientos de elevación y descenso del nivel del mar a escala mundial.

Aunque la analogía de las cordilleras con las arrugas que se originan en la piel de una manzana continuaría teniendo éxito, algunas de las preguntas que se formulaban seguían sin respuesta: ¿por qué las montañas no se distribuían regularmente como las arrugas en la piel de la manzana sino que se concentraban en determinados lugares formando las cordilleras? ¿por qué la formación de cordilleras tampoco se distribuía homogéneamente en el tiempo sino que parecía concentrarse en determinados momentos, las fases orogénicas? (el concepto de fase orogénica ha perdido vigencia con la tectónica de placas pero hasta los años setenta resultaba incontestable).

2.3 Los continentes suben y bajan

En el curso de una expedición a los Andes, a mediados del siglo XVIII, mientras estaba realizando los cálculos para establecer la altura de estas montañas, Pierre Bouguer descubrió que al pie de la cordillera la plomada se desviaba de la vertical menos de lo que cabía esperar. El hilo de la plomada, que normalmente apunta hacia el centro de gravedad de la Tierra, en la proximidad de masas importantes experimenta una desviación debido a la atracción gravitatoria que éstas ejercen. Si la desviación de la plomada era menor a la prevista, las montañas deberían tener una masa inferior a la supuesta, sólo así se explicaría la escasa atracción que ejercían sobre la plomada. Bouguer pensó que las montañas estudiadas debían estar casi huecas, lo que le hizo víctima de no pocas burlas.

Cien años más tarde, John Henry Pratt, arcediano de Calcuta, comprobó un efecto similar en el Himalaya. Para explicar que la atracción gravitatoria de la cordillera fuese menor de la esperada, Pratt construyó toda una interesante teoría sobre la génesis de las montañas: la existencia en determinados lugares del interior terrestre de temperaturas anormalmente altas, provocaría la dilatación de los materiales allí situados, lo que originaría las montañas; otra consecuencia inevitable de esta dilatación sería la disminución de su densidad, por eso la masa de las montañas era menor de la que cabía esperar.

La comunicación que Pratt presentó a la Royal Society despertó el interés del astrónomo George Airy, que en 1855 publicó su propuesta: la corteza se encontraba flotando sobre unos materiales poco resistentes, aunque no necesariamente líquidos, pero sí más densos. Comparó la corteza con unos troncos que se encontrasen flotando en el agua, sólo emerge una parte de ellos y los que aparecen más altos son también los más profundos.

Así, en los lugares en los que la superficie alcanza mayor altura, esa corteza ligera tendría también mayor profundidad: "*las montañas tendrían raíces*" y eso explicaría el defecto de masa detectado.

Las propuestas de Pratt y de Airy tenían elementos comunes: en ambos casos las montañas no son excesos de carga situados sobre la superficie sino que se continúan hacia el interior, y sólo vemos una parte de su volumen total, de manera que el exceso de masa en superficie es compensado por un defecto de masa en profundidad. Para

Pratt la profundidad de compensación era la misma en todas partes. Para Airy el nivel de compensación era más profundo en las zonas terrestres más elevadas.

En 1892 Dutton da a esta teoría el nombre de *isostasia* (equilibrio en griego), resaltando así su principal aportación: el equilibrio dinámico existente entre una zona externa poco densa ubicada sobre un manto más denso, en una situación tal que todo incremento de masa sería compensado con un hundimiento y toda pérdida con una elevación. Así, la pérdida por erosión motivará una elevación que reequilibra la situación, por el contrario toda sobrecarga generará el hundimiento.