

I.- EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LAS IDEAS ACERCA DE LA DINÁMICA TERRESTRE¹

Conocer la historia de las ideas que se han tenido sobre la dinámica del Planeta supone mucho más que disponer de una “información cultural” del pasado de la geología. En efecto, su análisis ayuda a comprender cómo se construye la ciencia, a entender el significado de ciertos conceptos, procedimientos y teorías, a conocer algunos de los principales problemas que se han planteado, las respuestas que se le han dado a estos problemas o las dificultades encontradas para su resolución.

Como se verá en el siguiente módulo, la epistemología y la historia de la geología pueden realizar aportaciones substanciales a muchos de los problemas relacionados con la enseñanza de los procesos geológicos internos que se plantean en el aula. Así, se mostrará cómo ayudan a detectar la existencia de posibles obstáculos que dificultan la construcción de un determinado conocimiento, a orientar el modo de superar dichos obstáculos, a conocer la potencialidad de determinados conceptos o procedimientos, a ponderar la funcionalidad de los contenidos y, en fin, suministran criterios para valorar si una secuencia u organización de los contenidos es o no adecuada.

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. De la extensa historia de las ideas sobre la dinámica de la Tierra hemos seleccionado aquellas que tuvieron mayor trascendencia en la construcción del conocimiento y/o que pueden tenerla hoy para el aprendizaje de estas nociones.

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 en términos "kuhnianos" 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. Conviene tener en cuenta el enorme interés que desde la perspectiva docente tienen estas "paleoteorías" porque en ellas se encuentran muchas de las ideas intuitivas que es posible detectar hoy entre los estudiantes de la educación secundaria.

¹ El texto que sigue es un resumen del libro: Pedrinaci, E. (2001): *Los procesos geológicos internos*. Ed. Síntesis. 222 páginas.

También las perspectivas estáticas, es decir, aquellas que consideraban inmutable a la Tierra, han estado presentes, especialmente durante los siglos XVI, XVII. Son propuestas que han negado la existencia de cambios relevantes en la superficie terrestre, los han minimizado o han considerado al diluvio como el único agente geodinámico relevante. Así por ejemplo, Gould² reseña una carta que Isaac Newton escribe a su colega Burnet en 1681 en la que le indica: "la actual topografía de la Tierra se modeló durante su formación inicial a partir del caos primitivo, y por tanto no fue esculpida por el diluvio de Noé". Newton hace referencia aquí a la teoría que Burnet acababa de publicar en su "Telluris theoria sacra". En ella defendía que la superficie terrestre original era perfectamente regular, de acuerdo con una distribución en capas concéntricas de la Tierra y que habría sido el diluvio el causante de las irregularidades del relieve que observamos hoy. Como se ve, la crítica que Newton hace a las tesis de Burnet está formulada desde una perspectiva estática, incluso más estática aún que la del propio Burnet.

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

- Teorías atectónicas
- Teorías tectónicas

Tabla 1.1
Teorías anteriores a 1830 sobre el origen de las montañas

	Agente causante	Autores	Período de vigencia	Idea básica
TEORÍAS ATECTÓNICAS	Creación divina	Interpretaciones literales de la Biblia	Hasta el siglo XVII	Las montañas son tan antiguas como la Tierra y fueron creadas con un aspecto similar al actual.
	La erosión	T. Burnet (1684)	Hasta el siglo XVIII	La Tierra era originariamente llana. La retirada de las aguas del diluvio formó los valles y por contraposición las montañas.
	La sedimentación y los cambios eustáticos	A. Werner (1.787)	Siglo XVIII y principios del XIX	La sedimentación preferencial en algunos lugares del océano haría que sus fondos fuesen irregulares. El descenso del nivel del mar dejaría unas zonas más elevadas que otras.
TEORÍAS TECTÓNICAS	Hundimiento	Descartes (1644) Steno (1669)	Siglos XVII y XVIII	Los estratos se depositan horizontalmente. El hundimiento posterior los deforma y deja unas zonas elevadas (las montañas).
	Levantamiento por el calor central	Needham (1.760) J. Hutton (1.795)	Siglos XVIII y XIX	El calor interno tendría tres efectos: la consolidación de los sedimentos, la inyección del granito y la elevación de los materiales para formar las montañas

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

² Gould, S. J. (1987): *La flecha del tiempo*. Alianza Universidad. Madrid, 232 páginas.

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).

Como ejemplo de esta diferenciación puede citarse al abate francés François Para de Fanjas, quien a finales del siglo XVIII publica su obra *'Elementos de Filosofía'*. En ella señala un doble origen para las montañas: Las grandes cordilleras, o "*Cordilleras de Montes*", son todas anteriores al diluvio y su formación "*No admite ni debe admitir explicación alguna física, porque su naturaleza y constitución no presenta nada que se pueda mirar como una dependencia de las Leyes generales del Universo (...)*". Estas montañas habrían sido formadas "*por un ser increado y criador, que infinitamente poderoso y libre formó la Tierra*". Las montañas pequeñas serían postdiluvianas, se trata de "*montañas subalternas que parece que son de un origen reciente, admite y aun a veces exige una explicación física; porque estas especies de montañas presentan fenómenos relativos a las causas físicas, y a acontecimientos posteriores a la Creación, cuales son las conchas fósiles, los árboles y huesos de animales que se han hallado petrificados en su seno.*" De Fanjas considera a los fósiles como indudables restos de seres vivos. En consecuencia, considera que allí donde se encuentren habrá que admitir una edad posterior a la creación.

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:

" Y como hubiera muchas hendiduras tales en el cuerpo E y las mismas se agrandaran siempre, sus partes se adhirieron tan poco entre sí que por último ya no podía sostenerse entre F [aire] y B [aire] y así se desplazó todo quebrado, hacia la superficie del cuerpo C [corteza interna]. Y no siendo esta superficie bastante extensa para recibir todos los fragmentos de aquél, adyacentes unos a otros, en el orden que antes tenían, algunos de los mismos debieron inclinarse a un lado y recostarse los unos sobre los otros." (Art. XLII)

Descartes cuida que sus láminas tengan rigor geométrico, mantiene las dimensiones de los diferentes fragmentos y explica la secuencia de la siguiente manera:

"Pues si, por ejemplo, en la parte del cuerpo E que muestra la figura, las fisuras principales se encontraban ubicadas en los puntos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 de tal suerte que dos fragmentos 2-3 y 6-7 comenzaron a desmoronarse antes que los demás, y los extremos 2, 3, 5 y 6 de los otros cuatro fragmentos antes que los opuestos 1, 4 y V, y también el extremo 5 del fragmento 4-5 antes que el extremo V del fragmento V-6; no es dudoso que los mismos deben estar dispuestos sobre la superficie del cuerpo C en el modo en que aquí se representa;" (Art., XLII)

³ Hallam, A. (1985): *Grandes controversias geológicas*. Labor. Barcelona. 180 páginas

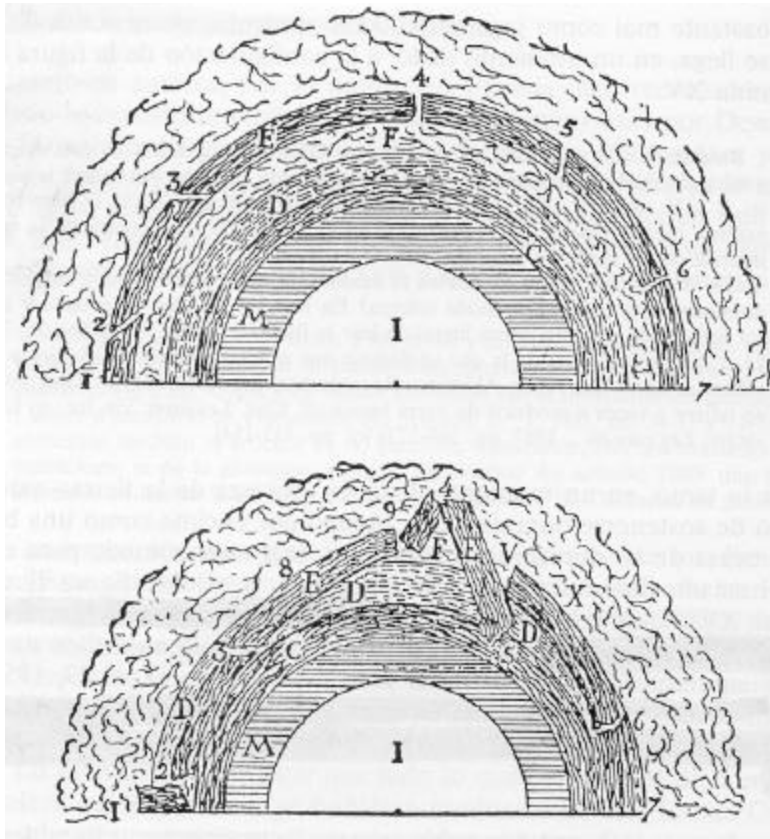


FIGURA 1.1 Las dos etapas finales de la formación de la Tierra según el modelo de Descartes

A continuación relaciona esta disposición con la estructura actual de la parte externa de la Tierra:

"entonces, claramente entenderemos en qué forma se han formado los mares sobre 2-3, 6-7, y semejantes, que los otros fragmentos que no están cubiertos por agua y no están mucho más elevados que el resto, han dado lugar a la formación de las llanuras; pero los que han estado más elevados y en gran pendiente, como es el caso de 1-2, 9-4V, han dado lugar a la formación de las montañas. Finalmente considerando que esas grandes piezas no han podido precipitarse en la forma en que ha sido dicho sin que sus extremos hayan llegado a romperse en infinidad de otras partes más pequeñas (...) veremos en fin por qué hay ordinariamente varias y diversas montañas en una misma región, algunas de las cuales son más altas, como hacia 4, o bien son menos altas, como hacia 9 y hacia V."

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 Prodomus"*, 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

⁴ Ellenberger, F. (1989): *Historia de la Geología. V. 1 De la antigüedad al siglo XVII*. MEC y Labor. Barcelona. 282 páginas.

que tenía previsto escribir pero que jamás fue publicado (Sequeiros⁵). En él, una vez fijado que la posición original de los estratos es la horizontal, propone cuatro causas por las que puede modificarse esta disposición:

- "- Acción del agua:
 - en superficie: cauces, canales, precipicios;
 - en profundidad: cavernas y pasos.
- Acción del fuego: expulsión de materia; formación de vacíos.
- Fractura de los estratos por sacudidas hacia arriba (erupción).
- Fractura por desplome en cavidades subterráneas".

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 Prodrómus 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 Toscana⁶:

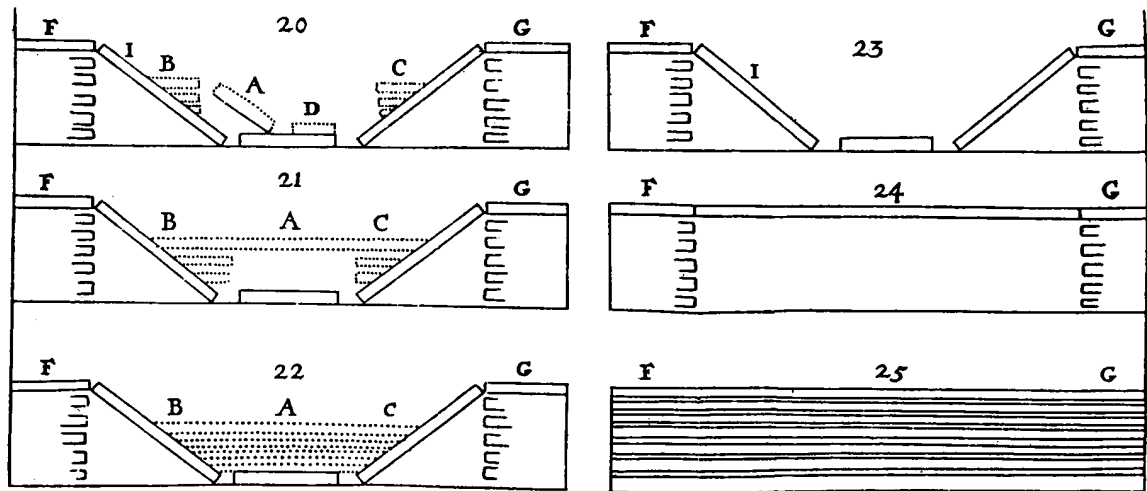


FIGURA 1.2 La primera figura representa la situación actual de la Toscana vista por Steno, a partir de la cual infiere retrospectivamente las "caras" anteriores. Con líneas de puntos representa los estratos arenosos, poco competentes. Con líneas continuas los estratos rocosos.

" Así como el estado presente de una cosa dada nos puede descubrir cuál fue el estado pasado de esta misma cosa, esto mismo se presenta con evidencia claramente en la Toscana, en la que a partir del aspecto actual se pueden conocer los indicios de las desigualdades de los cambios diversos que han acontecido en el pasado y que ahora describiré en orden inverso desde la situación más actual hasta la más antigua y primitiva.

1. Hubo un tiempo en el cual el plano inclinado A estaba en el mismo plano que el plano horizontal más elevado B; el borde (limbo) del plano en cuestión A (supuesto) así levantado, y por otra parte el borde del plano horizontal inferior C (actualmente) más elevado, se prolongaban más allá; sea que el plano horizontal inferior D estuviera entonces en el mismo plano que los planos horizontales más elevados B, C; sea que existiera allí (entre A y C) otro cuerpo sólido sosteniendo los bordes desnudos de los planos más elevados (véase más adelante

⁵ Sequeiros, L. (2003): Las raíces de la Geología, Nicolás Steno, los estratos y el diluvio universal. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 2003 (10.3)

⁶ *El Pródromo*. Nicolaus Steno. (trad. L. Sequeiros). *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 2003 (10.3)

nuestra alusión a las canteras subterráneas). O, lo que es lo mismo, en estos lugares donde hoy se ven colinas de rocas arenosas, cursos de agua, marismas, llanuras bajas, escarpes y planos inclinados, en otros tiempos todo era llano y en aquella época todas las aguas, tanto de lluvias como de manantiales, o bien inundaban esta misma superficie plana o bien se habían abierto por debajo canales subterráneos: por lo menos había cavidades bajo los estratos subterráneos.

2) En la época en que se formaba el plano B, A, C, y los planos subyacentes, todo el plano B, A, C fue cubierto por las aguas; o lo que equivale a lo mismo, en un determinado momento el mar se levantó por encima de las colinas formadas por rocas arenosas por muy altas que fueran.

3) Antes de que se formara el plano B, A, C, los planos F, G, I, tenían el mismo lugar que conservan actualmente, o lo que es lo mismo, antes de que se formaran los estratos de las colinas formadas por rocas arenosas, había en estos mismos lugares profundos valles.

4) En un determinado momento, el plano inclinado I estaba en el mismo plano que los planos horizontales F y G; y los lados desnudos de los planos I y G, o bien se prolongaban en continuidad, o bien había allí otros sólidos sosteniendo estos bordes desnudos, cuando se formaban dichos planos. O, lo que es lo mismo, en estos lugares en donde hoy se observan los valles entre las cimas planas de las altas montañas, hubo un tiempo una llanura continua bajo la cual se formaron inmensas cavidades antes de los hundimientos de los estratos superiores.

5) Cuando se formaba el plano F y G un fluido acuoso se extendía sobre él; o, lo que es lo mismo, hubo un tiempo en el cual las cimas planas de las más altas montañas estuvieron cubiertas por las aguas."

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, pero no había encontrado ninguna en el campo. Como en otras ocasiones es su amigo y discípulo Playfair quien nos narra el feliz momento del hallazgo:

“Nosotros, que veíamos estos fenómenos por primera vez, recibimos una impresión que no se nos olvidará fácilmente. Las pruebas palpables que nos aparecían, de uno de los más extraordinarios e importantes hechos de la historia natural de la Tierra, otorgaban realidad a aquellas especulaciones teóricas que, aunque probables, nunca hasta ahora habían podido autenticarse realmente por el testimonio de los sentidos.(...) Nos sentíamos como si retrocediéramos a los tiempos en los cuales los esquistos, sobre los que estábamos situados, estaban aún en el fondo del mar, y en los que las areniscas que teníamos enfrente empezaban solamente a depositarse en forma de arena o lodo (...) Todavía aparecía una época más remota en la que incluso los más antiguos de estos terrenos, en vez estar situados verticalmente en capas, yacían según planos horizontales en el fondo del mar, y no habían sido aún inquietados por esta inconmensurable fuerza (...) Todavía aparecían revoluciones más remotas en la distancia de esta perspectiva extraordinaria. Nuestros pensamientos se volvían vertiginosos al contemplar momentos tan remotos en el abismo del tiempo ...”

(Playfair, 1802. Illustrations of the huttonian Theory of the Earth)

Gohau⁷ subraya que Jean-André Deluc, naturalista de gran prestigio contemporáneo de Hutton, había visto calizas horizontales dispuestas sobre esquistos replegados sin mostrar la importancia de este hecho. En otras palabras, Hutton había creado en su mente la imagen de cómo debía ser una discordancia sin haberla visto en el campo. Deluc la había observado en el campo sin atribuirle ningún significado especial. Se trata de un excelente ejemplo que muestra la importancia de las teorías y la dependencia que de ellas tienen las observaciones.

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.

⁷ Gohau, G. (1987): *Histoire de la Géologie*. La Découverte. París. 260 páginas.

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).

El sistema gradualista que proponía Lyell era muy estricto. Su principal opositor probablemente fue el historiador y filósofo de la ciencia W. Whewell. Hallam (op. cit) nos ofrece un precioso texto de Whewell que data de 1832, aunque por su contenido podría haberse escrito siglo y medio más tarde:

"En realidad, al hablar de la uniformidad de la naturaleza, ¿no estamos obligados a utilizar el término en un sentido muy amplio, a fin de que toda nuestra teoría tenga consistencia? Se incluyen catástrofes muy intensas y extensas, ¿cuál es el límite de la violencia que debemos conceder a estos cambios? Con el fin de poder representar las causas geológicas actuando con la misma y uniforme energía durante todo el tiempo, debemos medir nuestro tiempo en largos ciclos en los que se alternan la violencia y el reposo; ¿cuánto tiempo debemos dar a este ciclo de cambio cuya repetición expresamos con la palabra uniformidad?

¿Y por qué debemos suponer que toda nuestra experiencia, tanto geológica como histórica, incluye más de un ciclo? ¿Por qué, hemos de insistir sobre ello, el hombre ha sido observador durante un tiempo suficiente como para obtener el promedio de las fuerzas que están variando a lo largo de un tiempo inmensurable?"

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 y, en una carta a Whewell (1837) escribe:

"Aquella intensidad de la misma o de otras fuerzas terrestres puede ser efectiva; nunca negué su posibilidad, aunque es conjetural. Lamenté que al intentar explicar los fenómenos geológicos, los prejuicios siempre hayan estado del lado malo; siempre ha habido una disposición para razonar a priori sobre la violencia extraordinaria y lo repentino de los cambios, tanto en la corteza terrestre inorgánica como en los tipos orgánicos, en vez de intentar construir teorías vigorosas de acuerdo con las operaciones ordinarias de la naturaleza."

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:

"y parece imposible que la corteza sólida exterior haya podido sostenerse sin apoyo de ninguna clase, apoyándose cada punto sobre el líquido interior. Este líquido (...) ha conservado su figura esferoidal regular que corresponde a un máximo de capacidad, siendo en parte desviado por desnivelaciones en esta figura en sus abolladuras, pero no pueden haberse formado dos de estas abolladuras sin que en cierta parte de la superficie tuviera lugar una compresión, mientras en otras una extensión. Las cordilleras corresponden esencialmente a las partes de la corteza terrestre en que la extensión horizontal ha disminuido por efecto de un aplastamiento transversal".

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.