

LOS ORIGENES DE LA GEOLOGIA ESTRUCTURAL

E. MARTINEZ GARCIA

Departamento de Geomorfología y Geotectónica.

Facultad de Geología, Oviedo. España

RESUMEN

Aunque numerosos aspectos relativos a la Geología Estructural como son los referentes a cortes geológicos, fallas, esquistosidad y cordilleras de plegamiento, aparecen ya en el siglo XVIII, no es hasta la primera mitad del siglo XIX cuando se puede considerar a esta parte de las Ciencias de la Tierra, consolidada, constituyendo un sólido cuerpo doctrinal, con un desarrollo aproximadamente semejante de los aspectos microscópico, mesoscópico y de gran escala, como se puede comprobar al repasar los progresos en las diferentes escalas.

ABSTRACT

Although numerous aspects related to Structural Geology, as are structural cross sections, folds, faults, schistosity and mountain building, are already born in the XVIII century, it is not until the first half of the XIX century when these Earth Sciences can be really considered as such, with a comparable development in small and great scale aspects as it can be deduced from the history of the birth of all these concepts.

I. ANTECEDENTES

1. Anteriores al siglo XVIII.

Las referencias a la formación de las montañas nos vienen ya desde Pitágoras (580 a J.C.), quien narra la formación de una colina en el Peloponeso “a causa de los vientos subterráneos igual que se infla la piel de una cabra”. Ideas semejantes se encuentran en Aristóteles (siglo IV a J.C.), que relaciona los volcanes con los terremotos, en Estrabón y en Plinio el Joven (siglo I a J.C.)

Estas ideas quedan luego oscurecidas durante el primer milenio de nuestra Era hasta la traducción de las obras clásicas por los árabes, reencontrándose en Avicena (1021), Alberto Magno (1205-1280), etc., con pocas variaciones. La influencia de la Biblia es patente y sólo se discute acerca del Diluvio Universal, efectos sobre el modelado terrestre y sobre la erosión en general.

En esta época ya se reconocen al menos dos tipos de montañas según su origen: las formadas por erosión y las que se deben a los vientos y fuegos subterráneos. Algunas hipótesis son curiosas, como la de Ristoro D'Arezzo, que en 1282 atribuye a las estrellas la formación de montañas, ejerciendo acción de imán que reproduce en la Tierra la forma de las constelaciones. Esta misma explicación es aceptada por Dante Alighieri en su escrito *De Acqua e Terra* en 1320. Por otra parte, las observaciones de D'Arezzo sobre los agentes externos y sobre la geología de Toscana son bastante correctas.

Así llegamos hasta Georg Bauer (Agrícola), que en 1546 considera que existen cinco clases de montañas según su origen: 1) por erosión de las aguas; 2) por acumulación eólica; 3) por vientos subterráneos; 4) por terremotos; y 5) por fuegos volcánicos, atribuyendo la mayoría de ellas a la primera causa. En estos tiempos, también Faventius (1561) expresa ideas parecidas en su libro *De montium origine*.

Ya en el siglo XVII tenemos una gran figura, reconocida como de influencia decisiva en casi todas las ciencias de la Tierra, pero principalmente en la Estratigrafía, Mineralogía y Geología Estructural: Stenon, quien su obra capital *De solido intra solidorum naturaliter contentum prodromus*, publicada en 1669 en Florencia, sienta los principios de la geología moderna, sobre todo al enunciar lo que se ha llamado el “principio de la superposición” y también por sus descripciones del modo de formación de la llanura de Toscana. Por observaciones efectuadas en los bordes de esta depre-

sión tectónica, dedujo que los estratos inclinados habían sido primitivamente horizontales y después dislocados por hundimientos “en gigantescas cavidades subterráneas”, como se puede apreciar en su esquemática configuración, considerada la primera serie de cortes geológicos correlativos (Fig. 1).

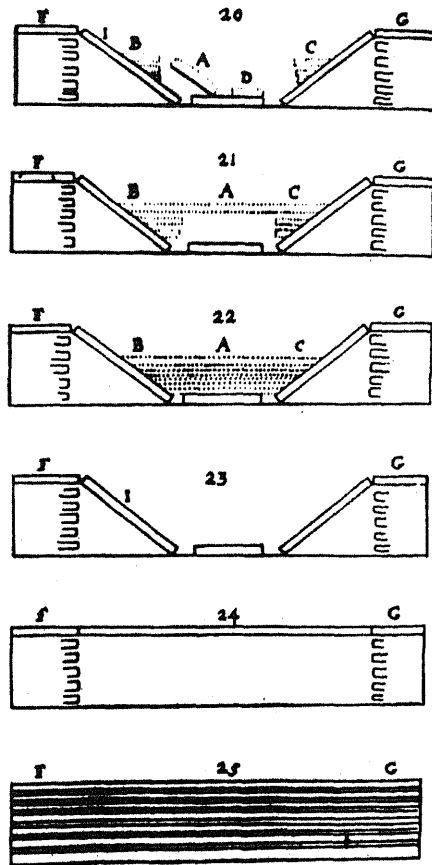


Fig. 1.- Formación de la Llanura de Toscana según STENON (1669).

Reconoció asimismo Stenon, además de la fracturación a que nos hemos referido, el plegamiento o dobladura de las sustancias “a causa de su tenacidad”. De esta forma llegó a establecer cuatro tipos de montañas: a) en bloques; b) de erosión; c) volcánicas; d) de plegamiento, precediendo así a Lehmann, Pallas, etc. La obra de Stenon tuvo una gran influencia en su época, alcanzando tres ediciones (Florencia 1669, Leiden 1679 y Pistorli 1763). Fue traducida del latín por Elie de Beaumont ya en el siglo XIX.

Otro científico de interés en esta época fue Martín Lister, quien en 1683 sugirió la conveniencia de construir un mapa del suelo o de los minerales de Inglaterra, utilizando colores y sombreados diferentes, aunque sin llegar a realizarlo.

2. El siglo XVIII.

Aunque el verdadero desarrollo de la Geología Estructural no tendrá lugar hasta el siglo XIX, es en el siglo XVIII cuando realmente se sientan las bases de este desarrollo, sobre todo en lo que respecta a las escalas meso y macroscópica.

Los primeros cortes geológicos se debieron a Johannes Scheuchzer, médico de Zurich y gran observador de la naturaleza, que en 1708 presentó a la Real Academia Francesa de Ciencias una representación paisajística de las riberas del lago Uri, en Suiza Central, en que representaba con toda fidelidad pliegues y fallas existentes (fig. 2). Asimismo se deben a este autor, los cortes publicados en la obra de Vallisinieri (1715) sobre el origen de las fuentes. Scheuchzer publicó los resultados de sus observaciones acerca de los Alpes, en Leiden en 1723. Por su parte, Strachey (1719) publica también un corte geológico de la Cuenca Carbonífera de Somersetshire, representando sobre las capas inclinadas con carbón, los terrenos discordantes mesozóicos (Fig. 3).

También Moro, en 1740, observó el plegamiento y la fracturación en las montañas llamadas por él «secundarias» y las representa en cortes, atribuyéndolas a fuerzas subterráneas originadas por fuegos internos. Introduce así este autor el concepto global de la constitución de las montañas, al distinguir las «primarias», de rocas no estratificadas y «secundarias», estratificadas.

Aunque Fontenelle (1720) ya indicó la necesidad de efectuar “mapas geográficos” en los que se señalarían las “materias de conchas hundidas en la Tierra”, Packe (1743) parece haber sido el primero en realizar un mapa geo-

lógico de los alrededores de Canterbury, aunque fue de mucha mayor trascendencia y alcance el efectuado en 1746 por Guettard en Francia. Este había observado la dependencia de la vegetación de la constitución mineralógica del suelo y sospechó que las sustancias minerales se encontraban distribuidas regularmente, construyendo lo que denominó “mapa mineralógico” de los alrededores de París, distinguiendo en el centro una “banda arenosa” ovalada rodeada por una “banda margosa” y esta a su vez por una «esquistosa» o «metalífera». Dedujo también, por lecturas de libros ingleses, que dichas bandas se continuaban por Inglaterra.

Es de destacar asimismo el científico ruso Lomonosov (1711-1765) más conocido por sus aportes en el campo de las ciencias físicas y químicas, el cual ya se refería a los estratos como habiendo sido depositados horizontalmente y después rotos y doblados por fuerzas interiores (fuegos internos), admitiendo levantamientos en unos puntos y hundimientos en otros simultáneamente. Asimismo indicó la existencia de elevaciones y hundimientos imperceptibles de larga duración que daban lugar al avance y retroceso de los mares.

En la segunda mitad del siglo XVIII se multiplican las figuras relevantes en Geología Estructural, entre las que podemos citar a Lehmann, Arduino, Ferber y Michell. Lehmann publicó en 1756 su obra clásica *Versuch einer Geschichte von Flotz Gebirge*, en la que describe observaciones sobre las rocas del Harz y Erzgebirge, y en la que reconoce tres órdenes de montañas: «primitivas», contemporáneas con la formación de la Tierra, con rocas poco variadas y verticales o inclinadas, *flotzgebirge*, más modernas, estratificadas, con numerosos fósiles y depositadas sobre las anteriores y por último las debidas a depósito de avenidas o actividad volcánica. En 1759 publicó excelentes cortes de las montañas alemanas. Arduino, publicó en 1759 sus observaciones sobre los Alpes, citando a su vez cuatro divisiones de montañas: «primitivas», con esquistos, sin restos orgánicos, con riquezas minerales abundantes y formando el núcleo de las montañas, «secundarias», con calizas, margas, lutitas y otros materiales sedimentarios estratificados, con pocos minerales, pero ricos en fósiles, «terciarias», de detritos más o menos sueltos derivados de la desintegración de los anteriores y «volcánicas», formadas por rocas volcánicas e inundaciones marinas. Esta clasificación de las rocas según su edad en tres Eras ha permanecido hasta nuestros días.

El sueco Ferber, se dio cuenta asimismo en 1759 de la existencia de granitos en el núcleo de las montañas, esquistos a ambos lados y de calizas en el exterior. Por su parte el inglés Michell (1760) advirtió que los terrenos se disponían en bandas paralelas, describiendo sus características, así como la

persistencia durante grandes distancias y el hecho de que se verticalizaran al aproximarse a las montañas. También indicó qué tal disposición se debía a la elevación de la parte central. Publicó diversos cortes con pliegues y fallas, así como de formación de volcanes. Estas estructuras serían debidas a la presión ejercida por vapores desde el interior, formados por la llegada de las aguas del mar a los fuegos interiores de la Tierra.

Fuchsel, expresó ideas parecidas, publicando en 1762 un excelente mapa y cortes geológicos de Thuringia. En su *Historia de la Tierra y el Mar basada en la historia de las Montañas de Thuringia* se encuentran ideas similares a las de Lehmann y Michell, dándose cuenta también de la posición del Carbonífero con restos de plantas, seguido por las Kupferschiefer, Zechstein, areniscas abigarradas, margas con yeso y Muschelkalk.

Pallas, de origen alemán y enviado por la emperatriz Catalina de Rusia a explorar su reino, publicó también en 1771 observaciones similares en los Urales. En 1778 publica Glaser en Leipzig el primer mapa en que las formaciones geológicas se representaban con ocho colores diferentes, diferenciando granito, gneis, esquistos, calizas, yeso, areniscas, arenas de río, arcillas y limos y marcando también las localidades de basalto, serpentina, etc. Posteriormente, Palassou en 1781 publica mapas de carreteras de los Pirineos con bandas de colores que representaban los diferentes terrenos.

En el último cuarto del siglo XVIII, ejerce Werner una gran influencia y se piensa que las capas inclinadas se han depositado de esta manera en el “océano universal”, sin preocuparse de las causas del plegamiento y de la fracturación. La falsedad de esta idea fue demostrada por el geólogo suizo de Sausurre (1787), mediante el estudio del conglomerado carbonífero de Aiguilles Rouges, comprobando que no existía engrosamiento hacia la parte inferior. De Saussure fue el primero en escalar el Mont Blanc y estableció un premio para los que lo consiguieran con posterioridad, contribuyendo así a desvanecer la repulsión existente en la época hacia las montañas.

El siglo XVIII termina con la importante contribución de Hutton a las ciencias geológicas en general. Con respecto a la Geología Estructural, se le puede atribuir a este autor sus referencias a las fallas, describiendo el salto horizontal y vertical y también el establecimiento de la «teoría de la elevación», posteriormente enunciada por von Buch y cuyo germen habíamos visto en Lomonosov. En 1788, Hutton afirma que “los movimientos más importantes en la Tierra son los verticales, debidos a abombamientos producidos por la fuerza de los fuegos internos de la Tierra... “Aunque la dirección de la fuerza que elevó a los estratos tuvo que haber sido de abajo hacia arriba, se combinó con la gravedad y con la resistencia de las masas

sobre las que actuó para crear un esfuerzo lateral y oblicuo y producir aquellas contorsiones de los estratos que, en gran escala, son los fenómenos geológicos más sorprendentes e instructivos (Playfair 1802).

EL SIGLO XIX

Durante el siglo XIX tiene lugar el desarrollo fundamental de las diferentes ramas de la Geología Estructural a todas las escalas, a partir de las bases sentadas por los investigadores que acabamos de citar. A continuación pasaremos revista sucintamente al desarrollo cronológico de la esquistosidad, plegamiento, fracturación, estudios geológicos regionales, orogénesis, desarrollo geosinclinal y Geofísica.

a) Esquistosidad

Comenzaremos a revisar el desarrollo de la esquistosidad aunque tuvo lugar simultáneamente con el del plegamiento, para seguir un orden desde pequeña a gran escala.

Las características petrográficas fundamentales de la esquistosidad fueron establecidas por Bakewell en 1815, con introducción de los términos «foliación» y «esquisto», indicando que la división en láminas se realizaba con frecuencia según una dirección diferente a la de los estratos, lo que es una prueba decisiva de que la estructura esquistosa no se debe a la estratificación. Posteriormente, Sedgwick (1835) atribuye la esquistosidad a la orientación de los materiales por fuerzas cristalinas. Fox (1838) cree que se genera por orientación de las partículas en un sedimento húmedo por la acción de una corriente eléctrica. Estas ideas se repiten en De La Beche (1839) y Hopkins (1847).

Phillips (1844) asocia la esquistosidad a la deformación de las rocas al observar su efecto en los fósiles de rocas esquistosadas. Sharpe (1847) la atribuye a un aplastamiento mecánico por compresión en ángulo recto respecto a los esfuerzos, sin admitir relación con la cristalización. Sorby (1853) estudia las manchas de reducción en los esquistos del N de Gales y cree que la reorientación de partículas planas como la mica, es más importante que el aplastamiento. Mediante experiencias con arcilla y escamas de hematites sometidas a compresión, consigue una buena esquistosidad. Sin embargo, Tyndall (1856) no admite estas ideas, vuelve a las de Sharpe, consiguiendo esquistosidades en cera por compresión y llama la atención sobre la refracción de la esquistosidad.

Haughton (1856) observa que la esquistosidad es perpendicular al eje menor del elipsoide de deformación, como ya había mostrado Sharpe y también demuestra que existe expansión según el plano de la misma. El concepto de elipsoide de deformación parece haber sido introducido por Thomson & Tait en 1879 y su geometría fue tratada por Harker (1886), con especial referencia a cizallamiento puro y simple y a las relaciones entre deformación bi- y tridimensional. Otros autores que se ocuparon de la esquistosidad son Hitchcock (1861), Lory (1864), Daubree (1876), Heim (1878), Ramsay (1881), etc.

Lyell (1835), Sedgwick (1835), Darwin (1846), Sorby (1857) y Harker (1886) entre otros, habían notado que muchos esquistos parecen estar recristalizados. El efecto de la solución bajo presión en la transferencia de material fue reconocido por Sorby (1879) y Bonney (1884) describe la transposición de la estratificación mediante este fenómeno.

b) Plegamiento

El origen de los pliegues comienza a clarificarse con los cortes y experiencias de Hall (1805, 1812) en Edimburgo. En el corte publicado en 1815, Hall reproduce los pliegues del Silúrico de Berwickshire, donde poseía una casa en la que pasaba temporadas su amigo Hutton. Se puede quizás considerar a Hall como el iniciador de la Geología Estructural experimental, ya que reprodujo en un aparato con tornillos laterales y usando arcilla plástica, estructuras semejantes a las de los cortes de la costa (Fig. 4). Como ya hemos visto, esta experimentación fue continuada posteriormente por Sorby en 1853 y por Tresla (1864, 1867, 1878, etc.), haciendo ver el papel de calor, agua y presión sobre la recristalización y deformación plástica de las rocas. Harker (1886) hace notar asimismo el efecto de la presión de confinamiento.

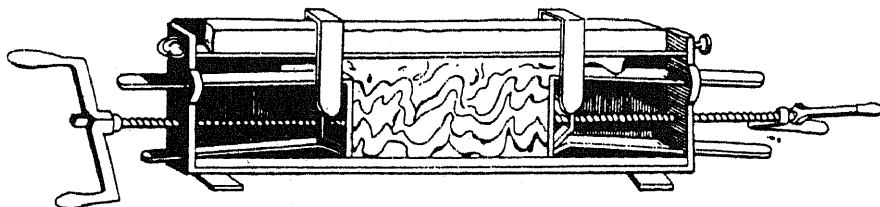


Fig. 4.- Aparato utilizado por JAMES HALL en 1812 para reproducir los pliegues observados en Berwickshire.

Hall atribuyó posteriormente, influido sin duda por las ideas de Hutton, el empuje horizontal que daba lugar al plegamiento, a la intrusión de masas graníticas. La influencia de las rocas ígneas sobre la estructura no ha dejado de ser discutida desde entonces.

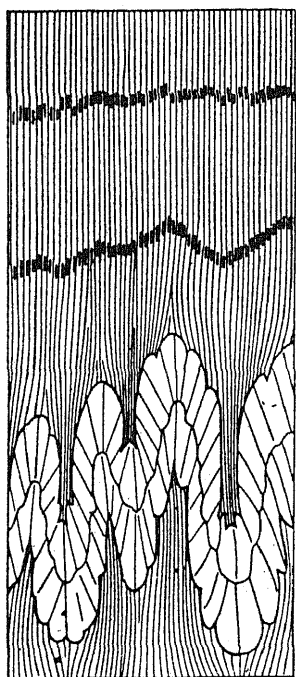
En 1818 enuncia von Buch su *teoría de la elevación (Erhebungstheorie)*, según la cual, las convulsiones originadas por la intrusión de los pórfidos augíticos, causaban desplazamientos, fracturas, hundimientos y plegamientos. Sobre esta teoría nos extenderemos posteriormente al referirnos a la orogénesis.

Los conceptos de anticlinal y sinclinal fueron introducidos respectivamente por Conybeare (1822) y Buckland (1823).

Es de gran importancia el trabajo de Thurmann (1830) *Essai sur les soulèvements jurassiques de Porrentruy* en que describe con detalle el plegamiento del Jura, atribuyéndolo a agentes plutónicos. Describe estratos deslizados unos sobre otros, estiramientos y rupturas angulares. Según este autor, las rocas se habrían plegado en su estado primitivo aún plástico y solidificado tras el plegamiento.

Dumont (1832) confecciona un mapa geológico con cortes, del distrito de Lieja, en que pone en claro el plegamiento isoclinal y se da cuenta de la existencia de series invertidas, por lo que no se puede emplear el buzamiento como criterio de edad relativa, según la creencia de entonces. Según este autor, tuvo lugar un violento plegamiento con inversión, lo que sugería el efecto producido por el deslizamiento de una parte de la corteza por un plano inclinado.

Es en estas fechas cuando tiene lugar el auténtico florecimiento de la Geología Estructural, con elucidación de estructuras pequeñas y grandes y su relación con las menores. Sedgwick (1835), Phillips (1844) y Sharpe (1847) se dieron cuenta del paralelismo general de la dirección de la esquistosidad y de los ejes de los pliegues en extensas áreas de las zonas orogénicas, y Darwin (1846), Sorby (1853) y Rogers (1856) (Fig. 5), observaron la semejanza de orientación entre los planos de esquistosidad y los planos axiales de los pliegues. Sedgwick, Phillips y Sharpe sugirieron que la esquistosidad se encontraba superpuesta a los pliegues, mientras que Tyndall (1856) concluyó que la formación de la esquistosidad y el plegamiento eran más o menos sincrónicos. Fischer (1844) indica que la esquistosidad y el plegamiento son formas iguales de satisfacer la misma compresión y Harker (1886) que son contemporáneos pero no exactamente sincrónicos, siendo la formación de la esquistosidad esencialmente posterior a la iniciación del plegamiento. Por su parte, Hopkins (1847) y Becker (1893) se encuentran entre los defensores de que la esquistosidad está formada por planos de cizalla inclinados respecto a los esfuerzos principales.



Fine-grained, dark coloured, shaly slate; the bedding shown by bands of coarser grain and lighter colour, which, in the upper part, are not contorted. The cleavage is well developed, and dips about 60° to S. by E.

Much contorted; of coarser-grained, light coloured, sandy slate, with less perfect cleavage.

Fine-grained slate, as at the upper part.

Fig. 5.- Corté vertical de los esquijos de Ilfracombe, North Devon realizado por SORBY en 1835.

De la Beche (1830) primer director del Servicio Geológico de las Islas Británicas, dibuja diversos cortes ilustrativos del plegamiento y sus relaciones con otros terrenos (Fig. 6) y efectúa un estudio del S de Gales (1846) en el que llega a la conclusión de que el plegamiento se debe a una compresión lateral, describiendo las relaciones cronológicas entre dos plegamientos superpuestos, mostrando que el más moderno es cortado por un granito posttectónico en Cornualles y Devon. Mientras tanto, el conocimiento profundo de la estructura de los Alpes comienza con Escher von der Linth, que indica la existencia de grandes cabalgamientos (*Kolossale ubschiebungen*) y describe en 1846 el famoso «doble pliegue» de Glarus. En los Estados Unidos tenemos mientras tanto la brillante descripción estructural de los Apalaches efectuada en 1842 por los hermanos H.D. y W.D. Rogers, en que indican la asimetría, plegamiento isoclinal, cabalgamientos, etc., aunque todavía con deficiente base teórica.



Fig 5

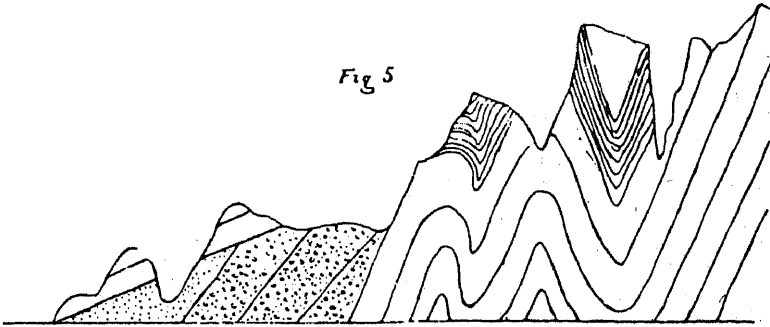


Fig 6

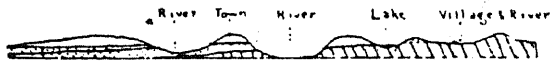


Fig 7

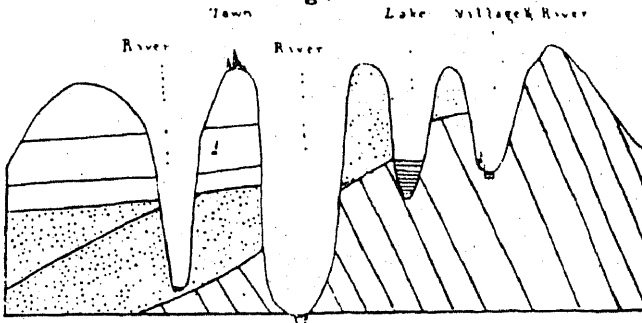


Fig. 6.- Cortes realizados por DE LA BECHE en 1846 para mostrar sus ideas.

Contrariamente a von Buch, Studer explica el plegamiento por un deslizamiento gravitatorio producido al elevarse una cordillera por la intrusión de granitos. Los mantos de corrimiento son reconocidos por primera vez por Bertrand en 1884 al reinterpretar el «doble pliegue» de Glarus de von der Linth (Fig. 7). Como autores que contribuyen notablemente al establecimiento de grandes cabalgamientos, podemos citar a Peach y Horne en Esocia y Tornebohm en Suecia.

c) Fracturación

Playfair en 1802 es uno de los primeros en utilizar el vocablo *falla* en la literatura geológica, refiriéndose a una encontrada al excavar un canal en Yorkshire. Sin embargo, la importancia de las fracturas en la Geología Estructural se pone en evidencia principalmente por los trabajos de Elie de Beaumont en 1841, el cual describe la formación de la Fosa del Rin por hundimiento de las dovelas de una bóveda (Fig. 8). Esta idea había sido anticipada por von Nidda refiriéndose a la Fossa Magna de Islandia en 1834, a la que consideraba como la parte central hundida de una gran bóveda traquítica, según transcribe von Buch en la segunda edición francesa del trabajo sobre las Islas Canarias en 1836. Sin embargo, fue Elie de Beaumont el primero en hacer una detallada descripción y estudio, con presentación de cortes estructurales de dicho fenómeno.

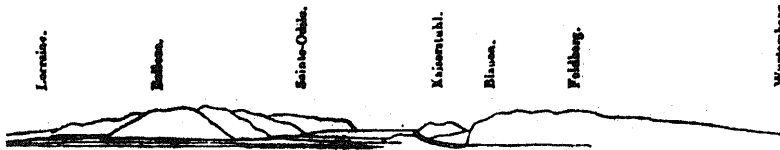


Abb. 5



fig. 8.- Formación de la Fosa del Rin según ELIE DE BEAUMONT (1841).

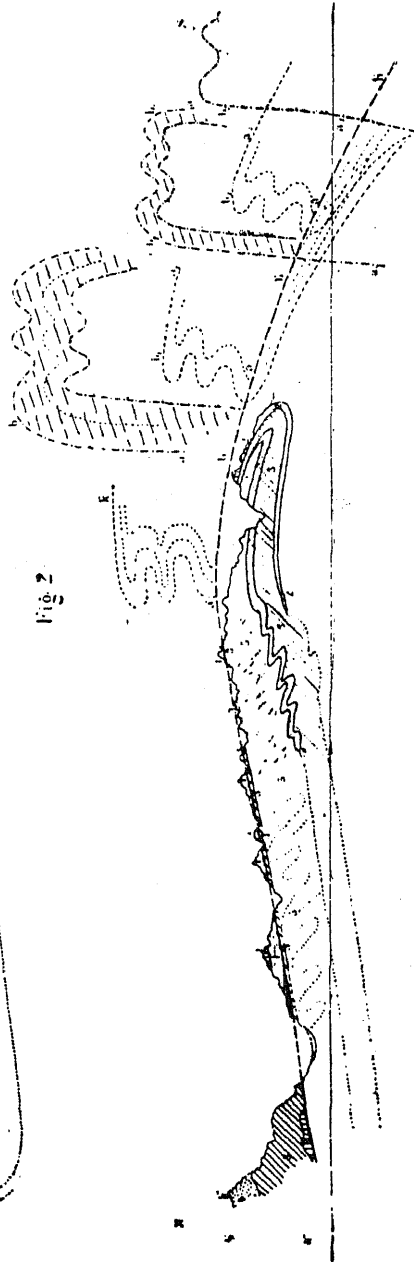
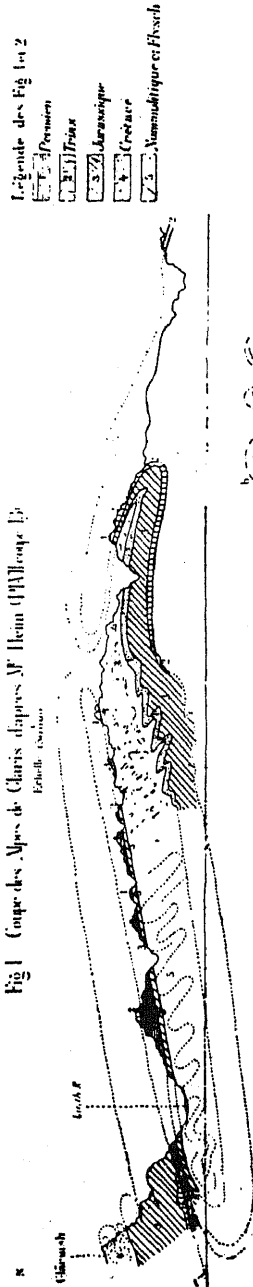


Fig. 7.- Interpretación del «doble pliegue de Glarus» como un manto de corrimiento por BERTRAND en 1884.

Los términos «graben» y «salto» habían sido ya introducidos por Jordán en 1803, en su trabajo sobre la minería de Thuringia. Los principios de la teoría del cizallamiento se deben a Coulomb. Navier define en 1833 el coeficiente de fricción interna, que fue generalizado después por Mohr (1900). Navier mostró que los planos de cizalla se forman teóricamente bisectando el ángulo formado por las direcciones de mayor y menor presión, pero que ésto no ocurre así en la realidad debido al coeficiente de fricción interna. Daubree (1878) realizó experiencias sobre la fracturación mediante la torsión de una placa de vidrio.

La sistematización de los tipos de fallas fue efectuada por Suess (1888) que distinguió los cabalgamientos (*wechsel*), fallas normales (*radial*) y de desgarre (*blatter*).

d) Tectónica regional y orogénesis

Juntamente con los avances en el conocimiento de las estructuras individuales, progresa también el conocimiento de la geología regional y evolucionan las ideas sobre orogénesis y constitución terrestre. En el siglo XIX ya se efectúan mapas geológicos de regiones extensas, como los de la Cuenca de París por Cuvier y Brongniart (1811) y Omalius d'Halloy (1813). El primer mapa de una nación fue el de Smith (1815) "de Inglaterra, Gales y parte de Escocia" en 15 hojas a escala 1/316.800 (5 millas/pulgada) y con una memoria de 50 páginas. Independientemente, Greenough publicó otro mapa de Gran Bretaña en 1819 siendo presidente de la Sociedad Geológica, que estaba mejor acabado y más completo que el de Smith. En 1817 publicó Mac-Clure un mapa de los Estados Unidos desde la frontera de Canadá hasta el Golfo de México y desde el Atlántico hasta el meridiano 94, en el que representaba con colores las rocas primitivas, de transición, secundarias, arenisca roja antigua y rocas aluviales. Sin embargo la mejor síntesis de las rocas de Norteamérica fue dada por Eaton en 1828.

El primer mapa geológico de Francia se comenzó en 1825 y se acabó en 1840 siguiendo el sistema inglés, que fue estudiado por Elie de Beaumont y Dufrenoy. En esa época se crea el primer Servicio Geológico de Inglaterra (1835) cuyo primer director fue de la Beche.

Al conocerse mejor la estructura de las rocas de la corteza comienzan a surgir teorías sobre los esfuerzos que originaron las dislocaciones que se ponían de manifiesto. Como ya habíamos dicho, una de las primeras con base científica fue la "teoría de la elevación" de von Buch; enunciada en 1818 en su conferencia *Über die zusammensetzung der basaltischen inseln und*

uber Erhebungskratere pronunciada ante la Academia Prusiana de las Ciencias y publicada en Berlín en 1820. Esta teoría es reiterada en un trabajo que escribe 27 años después, *Volcanoes and craters of elevation* (Edinburgh 1836). El germen de esta teoría se encuentra en parte en las enseñanzas de Werner, sobre los criaderos minerales, formados según grietas en relación con las fuerzas. Von Buch observó las alineaciones de volcanes y esto le dio la idea de que las montañas se habían formado por ascenso de rocas volcánicas por grietas principales paralelas, dando lugar a esfuerzos laterales que originarían el plegamiento. Con ello generalizaba su explicación del origen de los cráteres por elevación, ya que interpretaba los domos de Auvernia de pórfidos augíticos como formas de elevación que extendía a todos los conos volcánicos, con formación del cráter por hundimiento (Fig. 9).

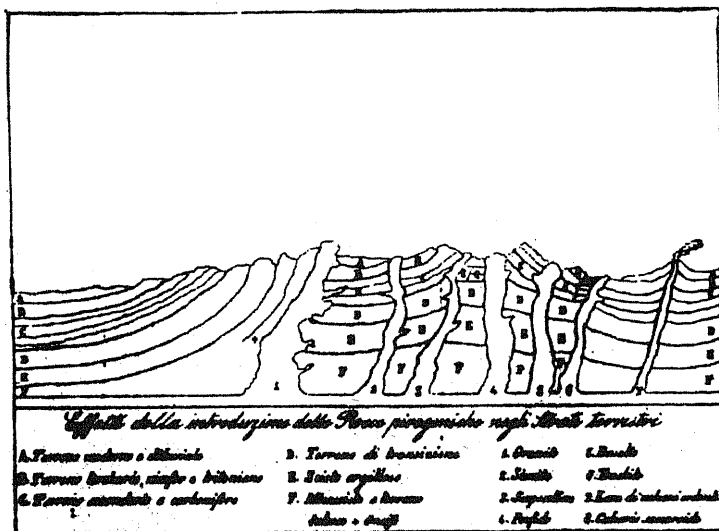


Fig. 9.- Ilustración de la «Teoría de la elevación» de VON BUCH según GEMMELLARO (1852).

Poulett-Scrope refutó esta teoría en 1825 en su libro *Considerations on volcanoes*, indicando que los conos volcánicos eran en realidad formas de acumulación y no de elevación. Posteriormente, al progresar el conocimiento de los Alpes y observarse la presencia de los granitos en las zonas internas, se llega a la conclusión de que a ellos se debe y no a los pórfidos, el levantamiento y plegamiento. El trabajo más representativo en este aspecto es el

de Studer en 1847. De este modo, la tectónica de la primera mitad del siglo XIX es verticalista y se piensa que si hay esfuerzos horizontales son en realidad transformación de los verticales.

Una idea importante que introduce von Buch en esta época es la de “sistemas geognósticos” de montañas o “sistemas montañosos considerados geológicamente”. Estos eran 1) El sistema de los Países Bajos con dirección NE.; 2) Sistema del Nordeste, con dirección NW.; 3) Sistema del Rhin, de dirección NNE.; y 4) Sistema Alpino. Estos sistemas serían la base de las etapas orogénicas, que luego encontramos en Elie de Beaumont, Suess y Bertrand.

Hacia los años 30 tienen lugar importantes contribuciones, como es la de Elie de Beaumont, quien en 1830 publica sus *Recherches sur quelques unes des revolutions de la surface du Globe...*, basándose en parte en las experiencias de Bischoff y St. Claire Deville sobre la contracción volumétrica que ocurría al solidificarse una roca fundida. Al enfriarse la Tierra fundida, desarrollaría una corteza que por contracción se ondularía y rompería en otras zonas con formación de montañas y pliegues paralelos a las fisuras. El magma del interior subiría por efecto del bloque hundido, formando así los ejes graníticos de las montañas. Para él también, las edades de los respectivos sistemas de montañas se podían determinar por la orientación y edad de las formaciones sedimentarias de los flancos. Las cadenas montañosas se formaban catastróficamente en las «revoluciones». Trató de probar que las montañas de la misma edad eran paralelas entre sí, al igual que Werner opinaba de los criaderos, y de esta forma reconoció primero 12 sistemas, que en 1852 aumentó a 21, que se disponían según una red pentagonal.

La idea del enfriamiento y contracción del globo se vio apoyada muy pronto por los trabajos de Dumont (1832), von der Linth (1841), los hermanos Rogers (1842), etc., que afirmaban la existencia de grandes empujes laterales y acortamientos en la corteza terrestre. La teoría de la elevación sufrió un total descrédito cuando Heim (1860) demostró que los granitos de los Alpes eran anteriores a la deformación principal.

Simultáneamente, encontramos el germen de dos ideas también muy importantes, la del geosinclinal y la de la isostasia, en Herschel, que en 1837 se ocupa de la elevación, metamorfismo, terremotos y volcanes que se pueden esperar del desplazamiento de las isogeotermas originado por la sedimentación y erosión, teniendo en cuenta la subsidencia causada por la carga de sedimentos acumulados y se da cuenta de que debe de ir acompañada por una elevación periférica consiguiente. Un antecedente de estas ideas sobre la isostasia lo tenemos en los hallazgos de Bouguer en 1735.

En la segunda mitad del siglo XIX existe un notable avance y desarrollo de todas estas ideas. Con respecto a la isostasia, Everest, encuentra en 1850 discrepancias en las mediciones gravitatorias en la India, semejantes a las halladas un siglo antes por Bouguer en Perú. Los cálculos efectuados por Pratt en 1855 mostraron que la desviación hallada era tres veces mayor que la teórica. En el mismo año Airy explicó este efecto suponiendo que las masas montañosas estaban compensadas por partes hundidas más ligeras en un sustrato más denso. Pratt propuso en 1858 un modelo diferente con una profundidad de compensación semejante y variaciones de densidad en la horizontal. En 1865 Jamieson, relacionó el levantamiento de los depósitos marinos del último período glacial con la recuperación cortical que sigue a la desaparición de los casquetes de hielo.

También encontramos por entonces a un predecesor de las ideas de la deriva continental, Snider, quien en su libro *La création et ses mystères dévoilés*, efectúa una reconstrucción con los continentes americano, africano y europeo unidos durante el Carbonífero, para explicar el hecho de que la mayor parte de las plantas fósiles conservadas en cuencas carboníferas de Europa, eran idénticas a las de las cuencas americanas.

Las ideas sobre el geosinclinal del Hall (1859) se pueden sintetizar en que las cadenas de montañas son simplemente acumulaciones espesas de sedimentos levantados y modelados por la erosión, atribuyendo las complicaciones estructurales a la subsidencia debida al peso de los sedimentos. Introduce así un concepto de gran importancia en la evolución geológica en gran escala como es el de «geosinclinal», aunque esta palabra no se utilizó hasta años después por Dana, el cual sistematizó en 1866-1873 sus opiniones sobre las cadenas montañosas basándose en las ideas de Hall, pero atribuyendo la subsidencia a movimientos activos de la corteza por esfuerzos tangenciales debidos a la contracción terrestre. Definió además los *geanticlinales* como concepto opuesto a los geosinclinales. Estos eran zonas de elevación progresiva compensada por el hundimiento de los geosinclinales vecinos (idea de la isostasia) y también a causa de una compresión lateral. Con respecto al plegamiento, encontramos en Dana el concepto de fase orogénica, al describir en los Apalaches largos períodos de inactividad seguidos de breves etapas de plegamiento. Este concepto es después desarrollado por otros grandes geólogos como Bertrand y Suess, en el siglo XIX.

En cuanto a la elevación de la cadena de montañas, Dana le atribuía un origen por compresión lateral, existiendo elevaciones de gran radio de curvatura que podían afectar también a zonas plegadas geosinclinales anteriores así como a geanticlinales y áreas continentales. Denominó monogenéti-

cas a las montañas plegadas en el curso de un solo ciclo geosinclinal o geantictlinal y poligenéticas a las de varios. Dana efectúa ya una clara distinción entre tectogénesis (plegamiento) y orogénesis (elevación de los sinclinorios).

Asimismo atribuyó el metamorfismo, intrusión magmática y actividad volcánica a la dobladura de los sedimentos y a las grandes temperaturas alcanzadas en las profundidades de la corteza. Los geosinclinales tenían una posición periférica respecto a los continentes, migrando sucesivamente en dirección opuesta a las masas continentales. La compresión se originaba en el dominio oceánico y era dirigida hacia el continente. Después de cada período de plegamiento y formación de montañas se añadía una nueva zona geosinclinal al continente (lo que después fue llamado «acreción continental»).

Las ideas de Dana fueron universalmente aceptadas hasta que surgieron las de Haug en 1900.

Mientras tanto, en el último cuarto del siglo XIX ocurren importantes aportaciones a la Geología Estructural. Una de ellas es la publicación por Suess a partir de 1875 de *Die Entstehung der Alpen*, en cuya obra se obtiene por primera vez una visión de conjunto de casi todos los aspectos de la geología a escala mundial: descripción de cadenas montañosas y sus relaciones mutuas, edades de las mismas y relación con escudos y depresiones, características fundamentales de continentes y océanos, etc., etc. Asimismo supone que la corteza terrestre es heterogénea, con zonas rígidas y plásticas que reaccionan de manera diferente ante los diferentes esfuerzos, para explicar porqué los procesos tectónicos seguían cursos distintos en las diversas regiones, en oposición a las ideas de von Buch y Elie de Beaumont, como ya hemos visto.

Entre otras grandes aportaciones tectónicas tenemos las de Heim, que en 1878 publica su extraordinario *Untersuchungen uber den Mechanismus der Gebirgsbildungen* en que examina la mecánica del plegamiento y formación de montañas desde el punto de vista de la hipótesis de la contracción. Cornet y Briart (1877) se basan en el enorme trabajo de Gosselet para el establecimiento de la cronología relativa del Paleozóico franco-belga, y reconocen dos importantes períodos de formación de montañas en Bélgica: post-Silúrico y post-Carbonífero, siendo de esta forma los primeros en datar etapas orogénicas. Por último, en 1883 comienzan a aparecer los volúmenes de *Das Antlitz der Erde* de Suess, obra capital de la geología clásica, en que se amplían y mejoran todas las concepciones de *Die Entstehung der Alpen*. En su referencia a las montañas europeas, rehabilita Suess las denominaciones de «armoricano», «variscico» y «caledoniano».

Todos estos aportes influyeron indudablemente en Bertrand de quien ya hemos dicho que en 1884 reinterpretó magistralmente el «doble pliegue» de Glarus, descrito por von der Linth en 1846 y por Heim en 1878, como un gran manto de corrimiento, inaugurando así la etapa del estudio moderno de los Alpes y de otras muchas cordilleras de plegamiento. En 1887, efectúa Bertrand una excelente descripción de los sistemas de montañas de Europa, analizando las discordancias angulares y estableciendo la naturaleza periódica de los movimientos tectónicos a gran escala. Distingue las deformaciones «huroniana», «herciniana» y «alpina», llamadas según las denominaciones de von Buch añadiéndolas a las ya descritas por Suess y aclarando que en el caso del sistema herciniano, la dirección NW con que fue definido por von Buch es debida en realidad a fallas y pliegues post-mesozóicos, siendo en él la estructura de dirección NE. Por último citaremos a Schardt, quien en 1893 demostró que los Prealpes de Suiza occidental y Saboya era una masa de rocas de 40 x 125 km. desenraizada «flotando» sobre rocas más modernas, debiendo de haber sido trasladados muchos kilómetros según se desprendía de su excelente cartografía y comprensión de la geometría de las estructuras.

Mientras tanto, Fischer, en 1881, defiende el concepto de una corteza flotante y pone énfasis en la importancia de las raíces montañosas de Airy, formadas por compresión para la elevación de montañas y separación de cámaras magmáticas. No admite la hipótesis del enfriamiento de la Tierra para explicar los fenómenos tectónicos y aboga por una especie de propulsión cortical que da lugar a deriva. Dutton, esquematiza en 1892 la teoría de la «isostasía», y se rebela asimismo contra la teoría de la contracción proponiendo otra en que interviene la convección en el interior terrestre, originada por la subsidencia del borde continental. Esta convección originaría el plegamiento. La elevación posterior sería independiente del plegamiento y debida a «expansión subcortical del magma subterráneo».

Se introduce así el concepto de la convección en el interior terrestre que con posterioridad tendrá tanta importancia para comprender la tectónica global.

BIBLIOGRAFIA

ADAMS, F.D., 1938: *The birth and development of the geological sciences*, Dover Pub. Co., pág. 506.

ANDERSON, E.M., 1951: *The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain*, 2nd. ed. Oliver & Boyd, Edinburgh, pág. 206.

- AUBOUIN, J., 1965: *Geosynclines*, Elsevier, Amsterdam, pág. 335.
- BAILEY, E.B., 1935: *Tectonic Essays, Mainly Alpine*, Oxford Univ. Press, Oxford, pág. 200.
- CAILLEUX, A., 1968: *Histoire de la géologie*, Presses Univ. de France, Paris, pág. 128.
- CAROZZI, A.V., 1970: New historical data on the origin of the theory of continental drift, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 81, pág. 283-286.
- DENNIS, J.G. 1972: *Structural Geology*, Ronald.
- FENTON, C.L. & FENTON, M.A., 1952: *Giants of Geology*, Doubleday, New York, pág. 242.
- GEIKIE, A., 1905: *The Founders of Geology*, Dover Pub. Inc. New York (1962), pág 486.
- PFANNENSTIEL, M., 1969: *Die Entstehung einiger tektonischer Grundbegriffe-Ein Beitrag zur Geschichte der Geologie*, *Geol. Rundsch.*, 59, pág. 1-35.
- SIDDANS, A.W.B., 1972: *Staty cleavage - A review of Research since 1815*, *Earth Science Rev.*, 8, págs. 205-232.
- SITTER, L.U. de, 1964: *Structural Geology*, McGraw Hill Co., New York, pág. 551.
- SPENCER, E.W., 1969: *Introduction to the structure of the Earth*, McGraw Hill Co., New York, pág. 598.
- ZITTEL, K. von, 1889: *Geschichte der Geologie*, Oldenbourg, Munchen, pág. 192.