



## CAPITULO XX

# GEOLOGIA HISTORICA

La Tierra tiene un pasado y, en consecuencia, una historia en la que se han sucedido toda una serie de acontecimientos en el transcurso de los tiempos geológicos. Su estado actual no es otra cosa que la consecuencia final de todos estos acontecimientos, encadenados en el tiempo.

Las rocas que forman los continentes, su disposición en estratos superpuestos o plegados, los restos fósiles de animales o vegetales que contienen, las capas de carbón, etc., son auténticos “documentos históricos” del pasado de la Tierra, donde han quedado registrados acontecimientos pretéritos. En estos documentos, el geólogo “lee” materialmente la historia de nuestro planeta, análogamente a como un arqueólogo interpreta los restos de antiguas civilizaciones y llega a conocer la historia de los pueblos de la antigüedad.

### *El actualismo geológico.*

El principio básico para estas interpretaciones es el *actualismo* (1), criterio que admite, en términos generales, que los procesos geológicos han ocurrido siempre en la misma forma que acaecen en la actualidad.

Cuando en un estrato encontramos conchas fosilizadas de moluscos marinos, es señal indiscutible de que se formó en el seno del mar; si, por el contrario, contiene restos vegetales terrestres o de mamíferos que viven en los continentes, es seguro que se formó en un lago o como consecuencia de la sedimentación fluvial. Es lógico suponer que animales análogos a los actuales hayan vivido siempre en condiciones equivalentes.

Cada tipo de roca sedimentaria responde a un proceso geológico

---

(1) Véase lo dicho en el Capítulo I, págs. 23 y siguientes.

## GEOLOGIA HISTORICA

especial, durante el cual se ha formado; sin duda, una roca “salina” se ha formado en un ambiente en el que la evaporación era muy intensa, y su presencia nos indica que, en la época de su depósito, las condiciones climáticas eran distintas de las actuales. Una “tillita”, que es el resultado de la consolidación de una morrena glacial, nos demuestra la existencia de un glaciar antiguo, que luego ha desaparecido por completo. Una roca “eruptiva”, intercalada entre otras sedimentarias, nos habla de una erupción volcánica pretérita, etcétera.

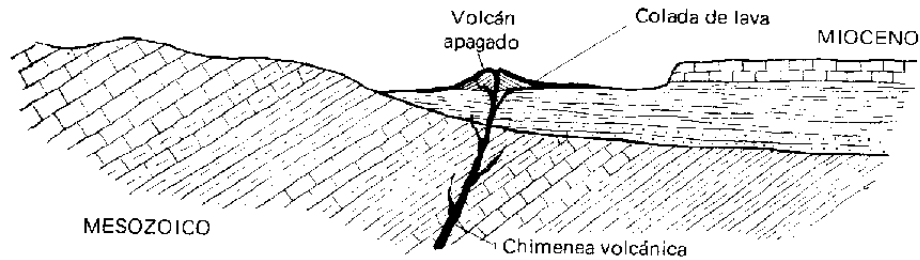


Fig. XX-1.—*Cronología geológica relativa.* Un fenómeno geológico es siempre posterior a la formación de los terrenos que afecta y anterior a los que no han sido afectados por él. En este corte geológico, el plegamiento orogénico causante de la inclinación que presentan los estratos mesozoicos es posterior a su formación, y anterior al depósito de los estratos horizontales del Terciario moderno (Mioceno), que aparecen discordantes sobre aquéllos. La erupción volcánica que atraviesa la formación mesozoica y la terciaria es posterior al Mioceno. Se marcan, además, dos ciclos de erosión: el primero posterior al plegamiento orogénico, que formó la cuenca donde luego se depositó el Mioceno; y el segundo posterior a la sedimentación del Mioceno y anterior a la erupción volcánica, cuyas coladas de lava se han extendido sobre la superficie topográfica originada.

Al criterio actualista va unido un factor temporal, en proporciones de las que no podemos darnos idea cabal (2). El levantamiento de una cadena de montañas, la invasión del mar sobre un continente, son fenómenos que precisan muchos millones de años, pero que han sido una realidad, y sus “huellas” se pueden leer en las rocas sedimentarias de la corteza terrestre: cuando una serie de rocas estratificadas, con fósiles marinos, se superpone a otras rocas formadas sobre un continente (aluviones fluviales, yesos, etc.), es evidente que tuvo lugar una invasión del mar, aunque ahora se haya “retirado” de nuevo, porque allí quedaron las rocas sedimentarias y los fósiles, como testigos de su presencia.

(2) Véase lo expuesto en las págs. 30-35, y el cuadro cronológico inserto en esta última.

*Cronología relativa.*

En Geología histórica es necesario establecer un orden en la sucesión de los acontecimientos que nos permite conocer su secuencia real. Ante todo, tenemos el principio de la “superposición de los estratos” por orden cronológico riguroso, tal como ya fue establecido en el capítulo I (3), y, además, se comprende que cualquier proceso geológico habrá afectado a los materiales o rocas, formados con anterioridad, pero no a los que se hayan formado posteriormente.

Estos dos principios de “cronología relativa” permiten interpretar la estructura de la litosfera, una vez que se ha establecido la secuencia de las rocas que la forman y su disposición mutua, tal como puede verse en los dos ejemplos que se ilustran en las adjuntas figuras. En la primera (fig. XX-1) vemos un ejemplo sencillo, análogo al que aparece en la fotografía de la página 40, donde una serie sedimentaria horizontal del Mioceno se superpone a otra serie mesozoica plegada. En la segunda (fig. XX-2) se puede ver otro ejemplo, de mayor complicación, donde aparecen dos ciclos orogénicos sucesivos que han plegado los terrenos paleozoicos y mesozoicos, respectivamente.

Aplicando estos criterios y buscando la interpretación “actualista” de los datos que nos proporcionan las rocas de la corteza terrestre, es como el geólogo llega a conocer con todo detalle la *historia geológica* de una región.

ESTRATIGRAFÍA

El estudio de la Geología histórica se basa, principalmente, en la *Estratigrafía*, que se ocupa de las rocas sedimentarias, estratificadas, en sus relaciones mutuas, espaciales y temporales, y de la interpretación de los acontecimientos de carácter “histórico”, que han quedado inscritos en ellas.

Son ciencias auxiliares de la Estratigrafía, la *Petrología* de rocas sedimentarias y la *Sedimentología*, que se ocupa de las condiciones de formación de los sedimentos, que luego darán origen a las rocas sedimentarias; también lo es, desde luego, la *Paleontología*, aunque esta ciencia, más biológica que geológica, tenga implicaciones en otros muchos campos científicos, filosóficos e incluso en Teología.

(3) Véase una explicación más detallada de estos principios, de cronología relativa, en las págs. 38-41.

## GEOLOGIA HISTORICA

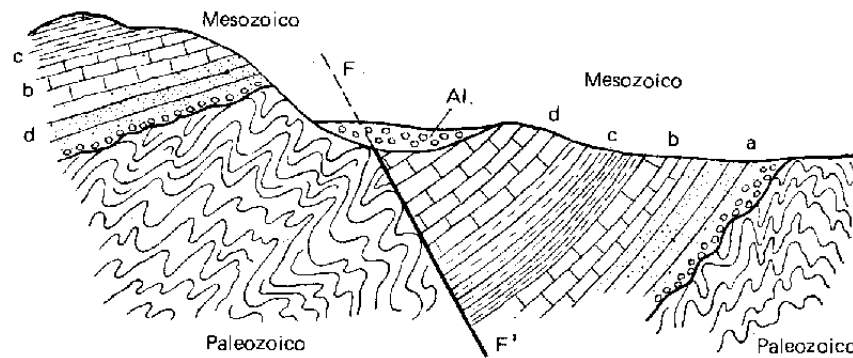


Fig. XX-2.—En este corte geológico, según los principios de la cronología geológica relativa, podemos establecer las siguientes etapas y fenómenos geológicos, en orden cronológico:

- 1.º Sedimentación de arcillas y cienos en un mar profundo (geosinclinal), durante el Paleozoico.
- 2.º Plegamiento orogénico y consiguiente metamorfismo de los sedimentos arcillosos, originándose pizarras, que en el corte aparecen fuertemente plegadas; emersión y formación de una cadena montañosa.
- 3.º Ciclo erosivo y arrasamiento del macizo paleozoico, que llegaría a formar una *penillanura*.
- 4.º Transgresión del mar mesozoico, sobre el macizo paleozoico arrasado; sedimentación en un mar nerítico, sucesivamente: gravas y arenas (a), calizas (b), margas (c) y nuevamente calizas (d).
- 5.º Nuevo plegamiento orogénico, que afecta al Mesozoico; emersión y constitución de un área continental.
- 6.º Formación de una fractura o falla (F-F'), que afecta al Paleozoico y al Mesozoico, con hundimiento de la parte oriental del Macizo anteriormente formado.
- 7.º Nuevo ciclo de erosión que da lugar a la superficie topográfica actual, en la que aún se marca el desnivel producido por la falla.
- 8.º Depósito de aluviones, durante el Cuaternario, al pie del escalón de la falla (Al).

La Estratigrafía se ocupa, en primer lugar, de la descripción de los estratos, de su disposición en secciones locales y de la correlación entre estas secciones, directamente asequibles al geólogo, hasta integrarlas en una *serie estratigráfica total* que abarque los estratos formados en el transcurso de los tiempos geológicos, desde los más remotos hasta la actualidad.

Por su parte, la *Geología Histórica* persigue una finalidad de orden superior, que es la interpretación de los datos petrográficos,

## TRANSGRESIONES Y REGRESIONES

estratigráficos y paleontológicos, integrándolos en la *historia de la Tierra*, hasta conocer su pasado geológico, su paleogeografía, sus cambios climáticos, etc.

La Estratigrafía tiene también un gran interés práctico y económico, toda vez que las rocas estratificadas contienen todos los yacimientos de combustibles de la corteza terrestre—tanto de carbón como de petróleo—y buena parte de los minerales radiactivos, que ya se consideran como fuente principal de energía. En las rocas estratificadas se almacena el agua subterránea, que tanta importancia tiene para la agricultura en regiones mal irrigadas en superficie; y, finalmente, también contienen muchos minerales que son materias primas de enorme interés industrial: sales potásicas, fosfatos, minerales de hierro, de cinc, de mercurio, etc., siendo en sí mismas las rocas sedimentarias, muy importantes como materiales de construcción o materias primas para la fabricación del cemento, del yeso, del vidrio, porcelana, etc.

### *Transgresiones y regresiones marinas (4).*

Cuando el mar avanza sobre el continente (transgresión), la línea de costa retrocede y los sedimentos acumulados en la cuenca marina, sobre la plataforma continental, van teniendo progresivamente mayor extensión (fig. XX-3 A). Además, al pie del acantilado en retroceso se formarán, en cada momento, materiales detríticos gruesos que darán origen a *conglomerados*, mientras que, a mayor distancia de la costa, los materiales depositados van siendo cada vez más finos, sedimentándose primero *arenas* y luego *arcillas* y *margas*. De esta forma, en una sección de la serie estratigráfica transgresiva, encontraremos, en la parte inferior, *conglomerados*; luego *areniscas*, y, por último, en la parte superior, *arcillas* y *margas*, que son las rocas detríticas más finas, sedimentadas a mayor distancia de la costa (véase también la fig. XX-4).

En cambio, cuando el mar se retira de la costa (regresión), la extensión de los sedimentos depositados en su fondo va siendo cada vez menor (fig. XX-3 B), y fácilmente se comprende que, en estas condiciones, los materiales detríticos gruesos se depositarán sobre otros más finos correspondientes a estratos anteriormente formados a mayor distancia de la costa. Así, pues, en una serie estratigráfica

(4) Las transgresiones y regresiones del mar se deben a cambios relativos de su nivel con relación a los continentes, que pueden ser debidas a movimientos epirogénicos de las masas continentales (véase la pág. 372), o a variaciones eustáticas del nivel absoluto del mar (véase la pág. 199).

## GEOLOGIA HISTORICA

regresiva, la secuencia resulta inversa a la del caso anterior, con *arcillas y margas* en la parte inferior, que luego pasan a *areniscas*, y finalmente *conglomerados* en la parte superior de la serie.

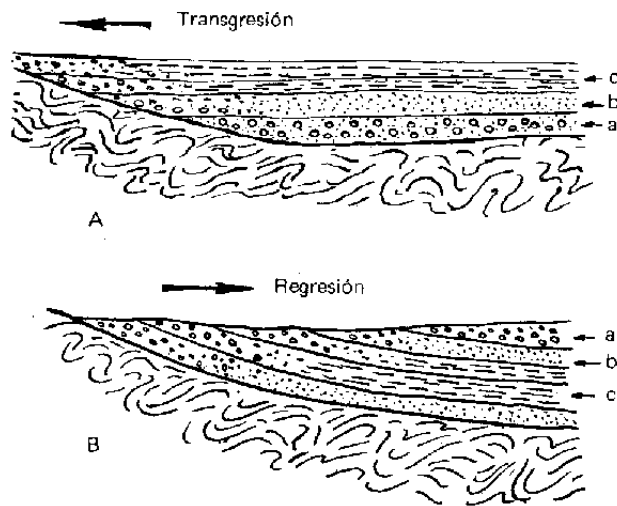


Fig. XX-3. — En una serie estratigráfica *transgresiva* (arriba), los estratos van teniendo cada vez mayor extensión, en el sentido en que se realizó la transgresión o avance del mar sobre el continente, mientras que en una serie *regresiva* (abajo), su extensión es menor en los superiores que en los inferiores. Además, el orden de superposición de los estratos es inversa: en la serie *transgresiva*, los materiales más gruesos son los que aparecen en la parte inferior; mientras que en la serie *regresiva* ocurre lo contrario. *a*, Conglomerados; *b*, areniscas; *c*, arcillas y margas. Compárese con la secuencia de la figura XX-4.

En la figura XX-2, la serie mesozoica depositada sobre el paleozoico arrasado es *transgresiva*, y en ella se observa esta secuencia estratigráfica, con intercalaciones de *calizas*, en la parte superior. La misma secuencia aparece en un "ciclotema", tal como se deposita en una cuenca de sedimentación en proceso de subsidencia, como tuvimos ocasión de estudiar en las cuencas carboníferas (5).

### *Análisis de series estratigráficas.*

El análisis de las series estratigráficas, consiste en el estudio de los estratos, depositados sucesivamente, en orden cronológico, que

(5) Véanse las págs. 307-308. Véase también la fig. IX-6 (pág. 250).

## ANÁLISIS DE SERIES

forman una secuencia, relacionando cada estrato con los anteriores y con los posteriores de la serie.

Las secuencias fundamentales, son las que se repiten con mayor frecuencia, por ejemplo, en una serie formada por estratos de rocas detríticas, la sucesión de más gruesos a más finos.

La secuencia normal, en un medio marino, corresponde a la sedimentación continua en una cuenca, donde se deposita una serie transgresiva que termina con la colmatación de la cuenca y con el cambio a un medio evaporítico. Esta secuencia se compone de cinco términos (fig. XX-4):

DETRÍTICO GRUESO - DETRÍTICO FINO - COLOIDAL - CALCÁREO - EVAPORÍTICO.

Las secuencias pueden ser positivas o negativas, según que correspondan, respectivamente, a series estratigráficas transgresivas o regresivas. Un ciclo sedimentario completo comprende una transgresión seguida de una regresión, y da lugar a una doble secuencia, primero positiva y luego negativa (fig. XX-4).

El paso de los términos detríticos al término calcáreo es siempre brusco; en cambio, en la serie regresiva, el paso del término calcáreo al detrítico, es gradual, de forma que las calizas van siendo progresivamente más arenosas.

Con frecuencia, las series están incompletas, pudiendo faltar alguno de sus términos, aunque lo más frecuente es, que falten los términos inferiores o los superiores, porque la transgresión o la regresión del mar, no haya sido completa. También pueden existir, secuencias complejas, en las que se repiten algunos términos, o una parte de la secuencia (fig. XX-4).

*Sedimentación gradada.*—Las corrientes de turbidez, de carácter espasmódico (véase la pág. 216), arrastran en suspensión materiales detríticos de granulometría muy variada, procedentes de los sedimentos acumulados en el borde de la plataforma continental, que se extienden sobre los fondos oceánicos en grandes extensiones. Cuando la velocidad de la corriente de turbidez disminuye, tiene lugar la sedimentación de los materiales que llevaba en suspensión, en forma “gradada”, primero los más gruesos y luego los más finos, dando lugar a lechos, en los que los granos están distribuidos, de abajo a arriba, de más gruesos a más finos, tal como ha podido comprobarse mediante experiencias de laboratorio.

Esta sedimentación es relativamente rápida, y se repite siempre que por alguna causa (terremotos, explosiones volcánicas, etc.), se produzca una de estas corrientes de turbidez espasmódicas, en los bordes del talud continental, frente a cuencas oceánicas subsidentes, donde hay grandes espesores de sedimentos, resultantes de los aportes procedentes del continente, es decir, en los *geosinclinales* (véase la pág. 375).



**GEOLOGIA HISTORICA**

Cada corriente de turbidez, origina un estrato con sedimentación gradada, separado del siguiente por un periodo de calma, en el que tiene lugar la sedimentación pelítica propia de las cuencas oceánicas, y aunque la sedimentación, en estas condiciones, resulta "rítmica", no es preciso que las corrientes de turbidez se hayan originado a intervalos iguales de tiempo, porque la sedimentación pelítica normal, es extraordinariamente lenta, y dos lechos de arenisca, separados por otro de arcilla, se han podido originar en momentos muy distantes temporalmente.

*La serie "flysch".*—Se trata de una serie rítmica, que se compone únicamente de dos términos, uno arenoso y otro arcilloso, que

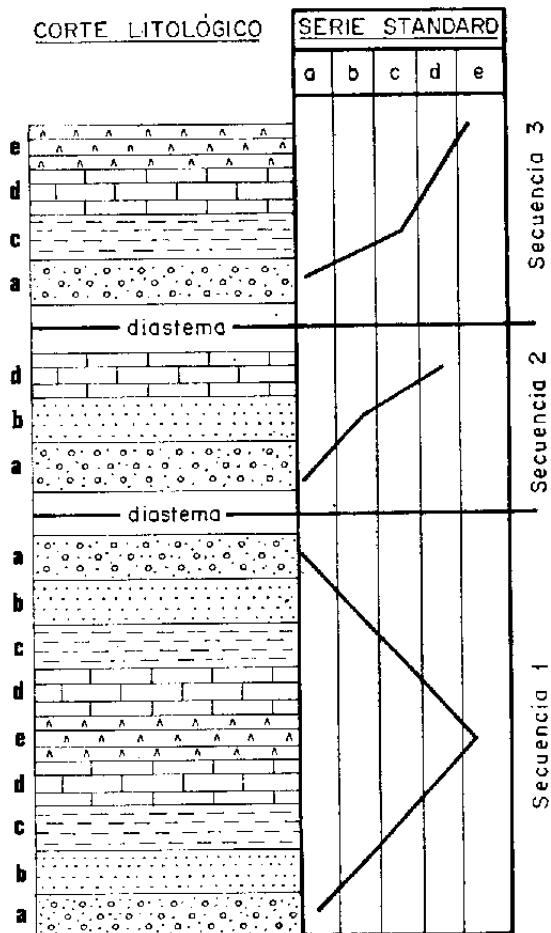


Fig. XX-4.—Análisis secuencial de una serie estratigráfica, en la que se han representado 3 secuencias, separadas por *diastemas*, que corresponden a discontinuidades en la sedimentación. Los términos de la serie son: a, conglomerado (detritico grueso); b, arenisca (detritico fino); c, arcilla (coloidal); d, caliza (calcáreo); y e, anhidrita (evaporítico). La secuencia 1, está completa (positiva y negativa); las secuencias 2 y 3, son incompletas, porque en ellas faltan los términos c-e y b, respectivamente.

## PALEOGEOGRAFIA

se repiten indefinidamente (6). El término arenoso suele presentar *sedimentación gradada*, señal de que se ha formado por una corriente de turbidez en un geosinclinal (véase la fotografía de la página 375); el tránsito al término arcilloso se realiza por una etapa de estratificación "ondulada", y el estrato arcilloso, pelítico, que carece de estructura, presenta en su capa superior huellas de origen mecánico y pistas de reptación, con huellas de actividad biológica, que luego aparecen en relieve en la cara inferior de la arenisca inmediatamente superpuesta (véase la pág. 635 y las figs. XX-22 y 23).

*Ciclotemas.*—Los ciclotemas son series rítmicas, complejas, en las que se sucede repetidamente el paso de la sedimentación en un medio palustre y marino. Los casos más típicos son aquellos en los que, como consecuencia de la acumulación de restos vegetales en el medio palustre, se llega a la formación de una capa de carbón, en cuyo caso la serie completa comprende (véase la pág. 308), en la fase palustre (continental): un término detrítico grueso, otro detrítico fino, el suelo de vegetación fósil, la capa de carbón y un tramo pelítico con restos de vegetales fósiles, con frecuencia flotados; y en la fase siguiente, al ser invadida la cuenca por el mar, como consecuencia del proceso de subsidencia, términos pelíticos y calcáreos con fósiles de animales marinos, terminando el ciclo con otros términos pelíticos a los que se asocian concreciones ferruginosas. Cada ciclo de sedimentación está separado del anterior por una superficie de erosión, que supone la emersión completa de la cuenca de sedimentación antes de iniciarse el ciclotema siguiente. En general, en la serie estratigráfica aparecen varios ciclotemas superpuestos que denotan otras tantas invasiones del mar, sucedidas a intervalos más o menos regulares, en la cuenca de sedimentación palustre.

*Paleogeografía.*—El estudio de las transgresiones y regresiones marinas y de la extensión alcanzada por el mar en un momento determinado, a escala regional, permite trazar las líneas de costa y, como consecuencia, se pueden llegar a establecer *mapas paleogeográficos*, que nos ilustran sobre las variaciones de las áreas continentales y de los mares, en el transcurso de los tiempos geológicos.

Los datos básicos para establecer en cada época la situación relativa de los continentes, nos los proporciona la teoría de la *expansión del fondo*

(6) La facies "flysch" (del alemán *flyschen*, deslizarse), se caracteriza por la alternancia de estratos duros (areniscas, calizas, cuarcitas) y blandos (arcillas, margas, pizarras), que cuando se saturan de agua dan lugar a deslizamientos en el terreno.

## GEOLOGIA HISTORICA

oceánico, a partir de las "grietas" que se han ido abriendo sucesivamente, desde que, en el Triásico se inició la disgregación del gran continente o "pangea" del Pérmico (fig. XIII-17). Con este criterio, y a base de establecer las sucesivas líneas de costa en cada época, es como se han trazado los diferentes mapas paleogeográficos incluidos en los capítulos XXII a XXV.

Fig. XX-5.—La serie estratigráfica del Triásico: areniscas y arcillas rojas del Buntsandstein, y dolomías del Muschelkalk en la parte superior, constituye una serie "concordante", que se presenta plegada, con buzamiento general de 40° E. Valle del río Mesa, en Nuévalos (Zaragoza). (Foto: B. Meléndez.)



### *Concordancias y discordancias estratigráficas.*

Se dice que una serie de estratos son "concordantes" cuando se disponen en capas o lechos, paralelos unos a otros, en la misma secuencia en que se depositaron (fig. XX-6, izquierda). En una serie concordante no debe faltar ningún término, es decir, que la sedimentación debió ser continua durante todo el tiempo que duró el proceso.

Una serie estratigráfica concordante puede haber sufrido procesos tectónicos que la hayan plegado, perdiendo sus estratos la horizontalidad primitiva, sin que por ello deje de ser "concordante", como ocurre, por ejemplo, en la serie del Triásico fotografiada en la figura XX-5, donde los estratos presentan un buzamiento uniforme de 40°.

CONCORDANCIAS Y DISCORDANCIAS

*Lagunas estratigráficas.*—Un primer motivo de “discordancia” en una serie estratigráfica lo constituye la falta de algunos términos de la serie, tal como aparece en la columna de la derecha de la referida figura XX-6, lo cual constituye un “hiato” en la sedimentación, que da lugar a la aparición de una “laguna estratigráfica”.

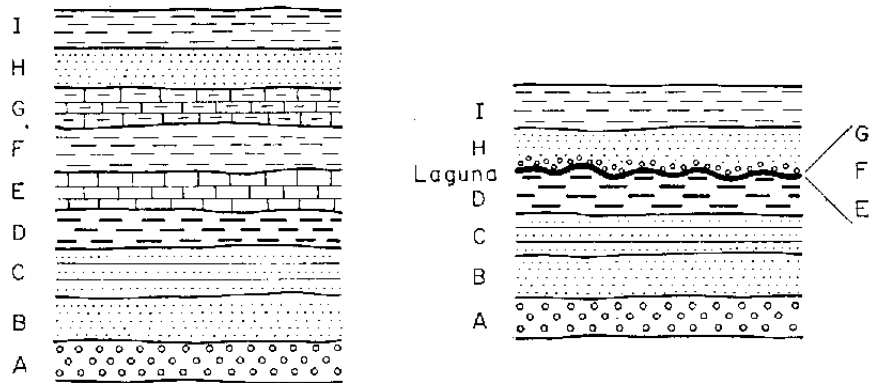


Fig. XX-6.—A la izquierda, una sucesión de estratos *concordantes*, en disposición normal, en el mismo orden en que se depositaron (A, el más antiguo; I, el más moderno). A la derecha, la misma serie estratigráfica, en la que existe un *hiato* o “laguna estratigráfica” que comprende los estratos E-F-G, que no se depositaron, porque después de la formación del estrato D, una elevación temporal del fondo de la cuenca de sedimentación impidió su depósito. Luego, al tiempo de formarse el estrato H, una nueva invasión del mar, sobre el área entonces emergida, permitió la sedimentación de la serie superior H-I.

En general, esta disposición de los estratos supone un cierto período en el que se ha interrumpido la sedimentación, debido a que, por un proceso epirogénico, el fondo de la cuenca se elevó hasta quedar emergida, quedando los materiales anteriormente depositados expuestos a la denudación. Posteriormente, un proceso general de subsidencia fue causa de que el mar cubriese de nuevo el área de sedimentación, depositándose nuevos estratos, separados de los anteriores por una *discordancia erosiva*. Esta disposición final, en la que todos los estratos siguen siendo paralelos, supone que tanto el movimiento epirogénico como el de subsidencia han sido rigurosamente *verticales*, sin lo cual, la nueva serie de estratos, depo-

## GEOLOGIA HISTORICA

sitada después del proceso de emersión, ya no sería paralela a la anterior, sino que formarían un cierto ángulo.

*Discordancias angulares.*—Si durante el tiempo transcurrido entre el depósito de la primera y de la segunda serie de estratos, se produjo un plegamiento orogénico, los estratos de la serie inferior han perdido su disposición horizontal primitiva, presentándose plegados o, por lo menos, inclinados, tal como aparece en las fotografías de las figuras I-6 (pág. 40) y XX-7. En este caso, existe una discordancia *angular* entre los estratos de la serie inferior (inclinados) y los de la serie superior (horizontales), habiendo sido el proceso geológico que la ha originado el que se indica en la figura XX-8.

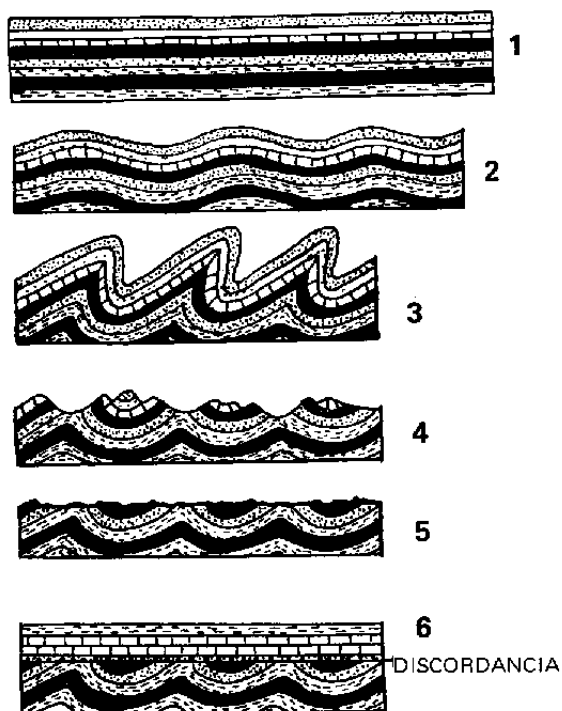
Siempre que se encuentre una discordancia estratigráfica de este tipo es señal de que, en el tiempo transcurrido entre la formación de las dos series discordantes, se desarrolló un ciclo orogénico seguido de la consiguiente erosión y formación de penillanura (vease la fig. XX-2).



Fig. XX-7.—Discordancia estratigráfica entre las calizas jurásicas plegadas, de la parte inferior, y los materiales detríticos de la base del Mioceno, en estratificación horizontal, de la parte superior. Ferrocarril y carretera de Madrid a Zaragoza, cerca de Somaén (Soria). (Foto: B. Meléndez.)

PALEONTOLOGIA

Fig. XX-8.—Una *discordancia estratigráfica angular*, como la que aparece en la fotografía de la fig. XX-7, presupone la serie de procesos geológicos que se indican en esta secuencia. Después de un ciclo de sedimentación (1), un movimiento orogénico ha plegado los estratos (2, 3), los cuales, al formar un relieve continental, han sido erosionados por los agentes de la dinámica externa (4), llegando a constituir una penillanura (5). Un proceso general de *subsistencia*, por un hundimiento del área continental, o simplemente por una elevación *eustática* del nivel del mar, ha permitido la sedimentación de una nueva serie de estratos (6), *discordantes* sobre los anteriores, que ya estaban plegados y erosionados.



PALEONTOLOGÍA

La Paleontología (7) es la ciencia que estudia los *fósiles*: restos de animales o vegetales que poblaron la Tierra en épocas pretéritas, que se han conservado en los sedimentos y se encuentran ahora asociados a las rocas sedimentarias.

*Fosilización*.—El proceso de fosilización supone la sustitución de la materia orgánica por compuestos minerales, de tal manera,

(7) Del griego *palaios*, antiguo; *onta*, el ser, y *logos*, tratado; es el tratado de los seres vivos antiguos. La Paleontología es más bien una ciencia biológica que busca la *interpretación* paleobiológica de los animales y vegetales, pero es también una ciencia auxiliar muy importante de la Geología en general, y de la Estratigrafía en particular. En los límites forzosamente impuestos a esta obra, no es posible extenderse mucho en las cuestiones implicadas en la Paleontología. A quien se interese por estas materias, recomendamos consulten la obra *Paleontología*, de B. Meléndez, Ed. Paraninfo, 1970.

## GEOLOGIA HISTORICA

que se conserven los caracteres propios, anatómicos o morfológicos, de forma que permita su estudio posterior. La fosilización supone una "mineralización" y, por tanto, un aumento de densidad; además, la incorporación de compuestos químicos nuevos, que no existían en el resto orgánico (por ejemplo, *flúor*), y con frecuencia cambio de coloración.

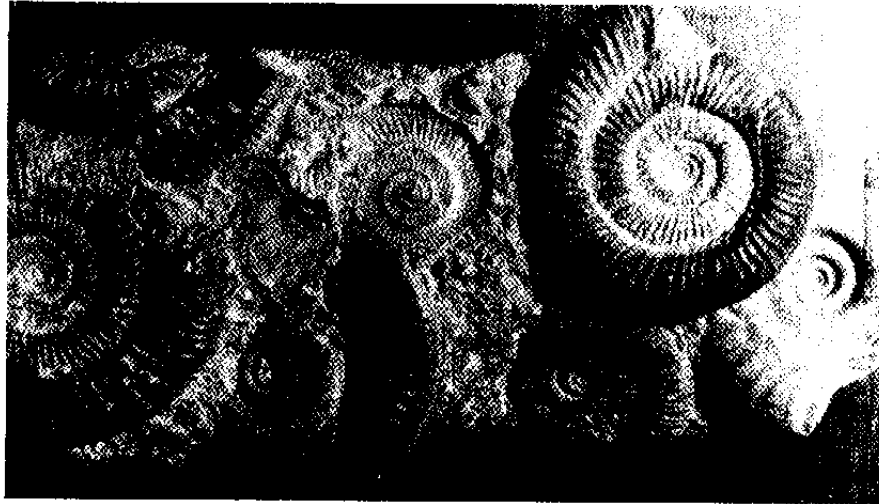


Fig. XX-9.—Las conchas de los *Ammonites* fosilizan muy bien, debido a que, inicialmente, ya estaban formadas, en gran parte, por carbonato cálcico. De estos Cefalópodos sólo se han conservado las conchas, y no se conoce ningún caso en que hayan fosilizado sus partes "blandas". En este fragmento de caliza aparecen asociadas dos especies de Ammonites, de los géneros *Dactylioceras* e *Hildoceras*, que son características del Lías. El ejemplar procede de Württemberg (Alemania). (Foto: B. Meléndez;  $\times 2/3$ .)

En general, sólo se conservan las partes duras, esqueléticas, que en parte ya estaban mineralizadas, como son las *conchas* de los moluscos (fig. XX-9), los *caparazones* de los Crustáceos, los *huesos* de los Vertebrados (fig. XX-10), etc.; pero en condiciones propicias también pueden conservarse restos de las partes blandas de ciertos animales (fig. XX-11), o incluso animales completos (8). De los ve-

(8) Por ejemplo, los insectos incluidos en el ámbar, que es una resina fósil, los cuales han conservado hasta su coloración propia. Otro caso bien notable es el de los *Mammuths* congelados que se han encontrado en los aluviones de los ríos de Siberia, que incluso conservaban la carne en condiciones de ser de-

## CLASES DE FOSILES

getales se suelen conservar las impresiones de las hojas (fig. I-9; página 27) y las partes lignificadas, que son las más resistentes.

El proceso de fosilización requiere un tiempo considerable y que el resto orgánico haya quedado incorporado a los materiales que se acumulan en un área de sedimentación, sin cuyo requisito terminaría por destruirse por completo. Este proceso está en íntima relación con las condiciones físico-químicas del medio en que ha quedado incluido el resto orgánico: los compuestos que más comúnmente reemplazan a la materia orgánica son el *carbonato cálcico* y la *sílice*, aunque en casos especiales puede ser el sulfuro de hierro o algún carbonato metálico. La fosilización de los vegetales se realiza en carbono o en sílice.

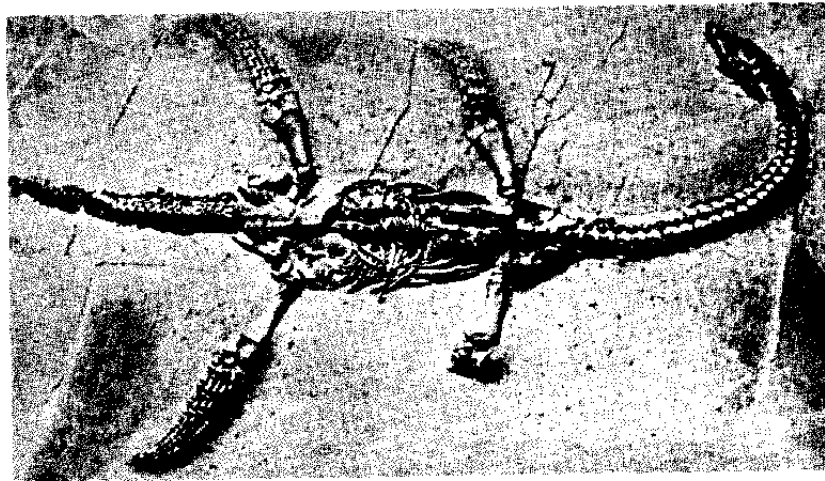


Fig. XX-10.—Esqueleto fósil, casi completo, de un *Plesiosaurus* (reptil marino) del Jurásico superior de Inglaterra. El ejemplar mide 3,50 m. de largo.  
(Foto: Dino di Colbertaldo; según LEONARDI.)

*Clases de fósiles.*—En el caso más favorable, la sustitución de materia orgánica por compuestos minerales se ha realizado “molécula a molécula”, respetando la estructura de las conchas, del hueso, o incluso la estructura microscópica (fig. XI-8, pág. 315); pero la mayoría de las veces sólo se conserva la forma externa, perdiéndose

vorada por los perros; sin embargo, en este caso propiamente no hubo “fosilización”, ya que el animal se conservó como en una cámara frigorífica natural.



## GEOLOGIA HISTORICA

la estructura del resto orgánico. Suele ocurrir que el fósil se ha perdido, habiéndose rellenado el hueco que dejó en la roca, por calcita o por sílice, que forman algo así como una "reproducción" o vaciado del fósil, pero sin estructura interna. En la figura I-8 (pág. 26) la concha del Ammonites no se ha conservado, sino simplemente su "reproducción" en la caliza (a la derecha) o "molde", que conserva todos los detalles de la superficie de la concha; al propio tiempo se ha formado también una "contrahuella" (a la izquierda) o "molde externo" del fósil, que muchas veces es lo único que se ha conservado, por haberse perdido el relleno del hueco donde estaba el fósil.



Fig. XX-11.—Fósil de un "calamar" del Jurásico superior, *Acanthoteuthis*, que se ha conservado completo, incluso las partes "blandas" del animal. Obsérvense los brazos guarnecidos de espinas en vez de las ventosas características de los calamares actuales. Caliza litográfica de Solenhofen (Baviera, Alemania) ( $\times 2/3$ ). (Según PAIRVIN.)

Un fósil, después de formado, puede sufrir un proceso de metasomatismo (9), de acuerdo con las condiciones físico-químicas a las que posteriormente se vea sometido, pudiendo quedar reemplazado el mineral que inicialmente lo formaba por otro distinto. En este proceso, llamado de *epigénesis*, se pierde siempre la estructura del fósil.

(9) Véase la pág. 251.

CLASES DE FOSILES

En ocasiones no se conserva el resto orgánico, pero quedan *huellas* de la actividad del animal, como, por ejemplo, huellas de su paso, cuando los sedimentos aún no estaban consolidados (figura XX-12), o pistas de reptación, si el animal se arrastraba sobre el fango o la arena (fig. XX-23); la parte de la Paleontología que se ocupa del estudio y de la interpretación de estas huellas y pistas

Fig. XX-12. — Huellas dejadas por un *Dinosaurio*, al caminar sobre la superficie aún blanda del fango, que se han conservado fósiles sobre la superficie superior del estrato de caliza margosa. Obsérvense también las grietas poligonales, formadas por desecación del fango (compárese con la fotografía de la figura XX-21). Del estudio de estas huellas se deduce que el *Dinosaurio* que las dejó tenía sólo tres dedos en sus patas. Jurásico del Sáhara argelino. (Según una fotografía de A. F. DE LAPPARENT.)



## GEOLOGIA HISTORICA

es la *Paleoicnología* (10). Otras veces se conservan fósiles los huevos del animal, o sus excrementos (*coprolitos*), o los conductos de habitación, excavados en los sedimentos o en las rocas por ciertos gusanos, por moluscos litófagos, etc. Todos estos fósiles (en sentido amplio) son de gran importancia en los estudios *paleoecológicos* (11), y proporcionan caracteres muy precisos para definir ciertas facies estratigráficas.

*Método de trabajo en Paleontología.*—El estudio y la interpretación de los fósiles se basa en tres principios fundamentales, que fueron establecidos por CUVIER a principios del siglo XIX, y que permiten su estudio “biológico”, como si se tratase de seres vivos:

a) El *actualismo biológico* supone, lógicamente, que los fósiles son restos de seres vivos que poblaron la Tierra en épocas pretéritas y que tenían las mismas necesidades y cumplían las mismas leyes biológicas que los actuales, aunque fuesen “distintos” en muchos aspectos. Así, los Moluscos Cefalópodos, cuyas conchas fósiles encontramos en las rocas (figs. I-8 y XX-9), eran animales marinos de vida libre; los Reptiles fósiles eran animales vertebrados que respiraban por pulmones y ponían huevos (algunos se han encontrado fósiles), etc.

b) La *anatomía comparada* permite reconstruir y estudiar los fósiles por comparación con los animales o vegetales actuales que tengan una organización análoga, aunque no sean idénticos. Así, por ejemplo, en un fósil como el representado en la fig. XX-10, se puede reconocer un Reptil por la estructura de su esqueleto “equivalente” al de los reptiles actuales, deduciendo además que se trataba de un animal acuático, buen nadador, por la estructura de sus extremidades, “análogas” a la de los delfines, y que era carnívoro, por los caracteres de su dentición, parecida a la de un cocodrilo. Los *Ammonites* (fig. XX-9) no tienen representantes actuales, pero se sabe que eran Cefalópodos por comparación de sus conchas con la de los *Nautilus* que viven en el Océano Índico.

---

(10) Del griego *iknion*, huella. La interpretación de las huellas y pistas permite identificar al animal que las ha producido y además puede proporcionar datos importantes sobre su anatomía (por ejemplo, número y disposición de los dedos) o sobre sus costumbres y reacciones psíquicas, todo lo cual permite un mejor conocimiento de los animales de épocas pretéritas.

(11) La *Paleoecología* (del griego *oikos*, habitación, residencia) estudia las relaciones existentes entre los animales y vegetales fósiles y el medio ambiente en que vivieron.

### METODO PALEONTOLOGICO

c) La *correlación orgánica* establece que todas las partes anatómicas de un organismo se corresponden entre sí como las piezas de un conjunto, respondiendo a necesidades específicas del ser vivo a que pertenecen, de tal forma, que con una sola de tales piezas, y aun con un fragmento, puede ser reconocido el organismo completo. Así, las conchas de los Moluscos sirven perfectamente para caracterizarlos, como si se tratase del animal completo; los dientes de los mamíferos son tan característicos que uno solo basta para reconocer una especie determinada; un hueso es suficiente para caracterizar al animal completo, etc.

Este principio es importantísimo en Paleontología, donde corrientemente sólo disponemos de fósiles incompletos, y en el mejor

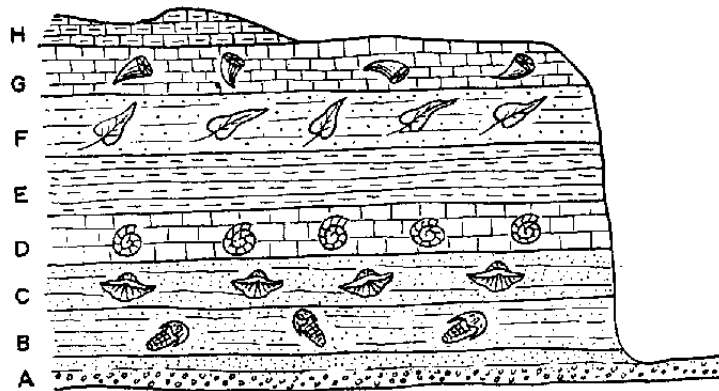


Fig. XX-13.—En una sucesión de estratos A-B-C... H, que no han sufrido trastornos tectónicos desde su formación, los más antiguos son los inferiores, y los más modernos los superiores, apareciendo superpuestos en orden cronológico riguroso de depósito. De esta forma, los fósiles contenidos en el estrato "E" (*Trilobites*) son más antiguos que los *Braquiópodos* contenidos en el "C", y éstos a su vez más antiguos que los *Goniatites* asociados al estrato "D", pudiendo así establecerse un orden cronológico de sucesión para los fósiles, cada uno de los cuales tiene una edad definida.

Recíprocamente, los fósiles asociados a los estratos, sirven a *posteriori*, para establecer entre éstos una cronología relativa: el nivel "B" de areniscas con *Trilobites*, o el "D" con *Goniatites*, tienen una posición definida en la columna estratigráfica A-H, y podrán reconocerse en cualquier otra localidad, siempre que contengan los mismos fósiles. Las areniscas con *Trilobites* estarán siempre debajo de las que tienen *Braquiópodos*, y éstas, a su vez, debajo de las calizas (D) con *Goniatites*; y cualquiera de estos niveles estará siempre situado debajo de las areniscas con *Plantas* fósiles del nivel F y de las calizas con *Corales* del nivel G, siendo más antiguos que cualquiera de estos últimos.

## GEOLOGIA HISTORICA

de los casos, sólo de las partes esqueléticas (conchas, caparazones, huesos, etc.). Sin embargo, igual que en el caso anterior, se precisa disponer de un punto de comparación; conocer un fósil completo, para poder luego identificarle por una de sus partes. Cuando no disponemos de un "tipo" de comparación, la interpretación del fósil o su identificación plantea serios problemas al paleontólogo, cuya resolución no siempre es fácil ni aun posible.

El estudio e interpretación de los fósiles precisa, en primer lugar, una labor de integración, hasta reconstruir el animal o vegetal fósil en todas sus partes; primero las partes esqueléticas y luego las partes blandas, generalmente no fosilizadas, utilizando los recursos de la *anatomía comparada* y de la *correlación orgánica*, para después restituirle al ambiente en que vivió, estudiando su paleobiología. Luego, posteriormente, cuando encontremos un fragmento fósil, sabremos que pertenece a ese animal o vegetal, y podremos obtener las consecuencias paleontológicas de su presencia en una determinada roca sedimentaria.

*Los fósiles característicos.*—Desde que los fósiles empezaron a estudiarse con criterio científico, pudo establecerse que los contenidos en un determinado estrato, o conjunto de estratos, eran distintos de los que aparecían en otros estratos inferiores o superiores (figura XX-13), sin que se repitiesen nunca en estratos de diferente edad geológica (12). De esta forma, los fósiles eran de extraordinaria utilidad para determinar la edad geológica de los estratos, siempre que, previamente, se hubiese establecido su orden de sucesión. Así surgió el concepto de *fósil característico* o "fósil guía", que es el que sirve para caracterizar una determinada época de la historia geológica, porque sólo aparece en los estratos formados en aquel tiempo.

La razón de ello estriba en que los seres vivos han evolucionado en el transcurso del tiempo por un proceso *irreversible*, dando lugar a series evolutivas o filogenéticas (13), en las que los fósiles va-

(12) Este principio básico, que permite aplicar la Paleontología a la Estratigrafía (véase la pág. 41), fue establecido en forma empírica por W. SMITH, para los estratos del Jurásico de Inglaterra.

(13) La *filogenia* (del griego *phyleh*, especie, y *genos*, origen), estudia el origen de los seres vivos, su encadenamiento en el tiempo geológico, su evolución. La *teoría de la evolución biológica* fue establecida por DARWIN, con base paleontológica, hace algo más de un siglo. En la actualidad, la evolución de los seres vivos se acepta como un hecho histórico, como una realidad no sólo demostrada, sino que ya se va conociendo también el mecanismo por el cual se ha producido el proceso evolutivo. Ante todo, si la Paleontología demuestra que los

FOSILES CARACTERISTICOS

rian en sus caracteres en función del tiempo (figs. XX-14 y 15). Así, en estratos sucesivos, aparecerán fósiles distintos, que no se repetirán nunca, porque la evolución—como todo proceso que es función del tiempo—no se repite, no retrocede.

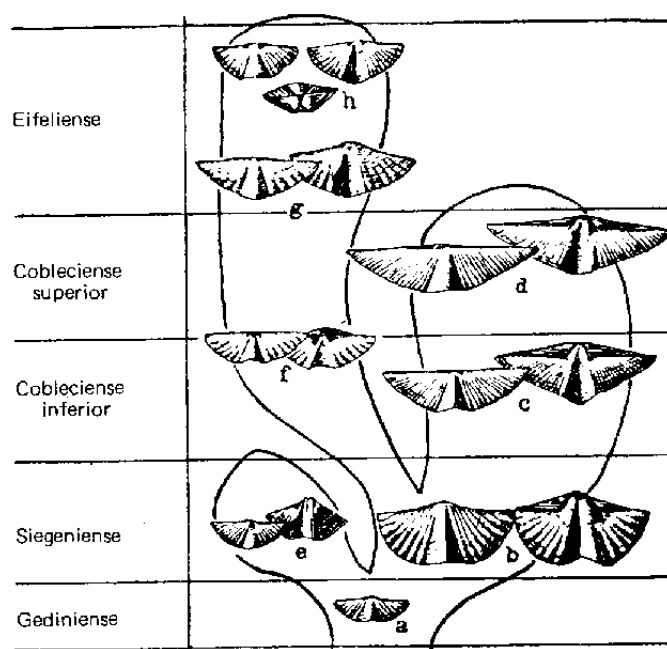


Fig. XX-14.—Esquema en el que se ha reconstruido la "filogenia" de los *Spirifer* (Braquiópodos paleozoicos) durante el Devónico inferior y medio. Los sucesivos términos de las series evolutivas (a-b-c-d; b-f-g-h; a-e) son "fósiles característicos" de los pisos del Devónico donde se encuentran, que corresponden a las épocas en que vivieron. Las especies de *Spirifer* representadas son: a, *mercurii*; b, *primaerus*; c, *hercyniae*; d, *paradoxus*; e, *hystericus*; f, *arduennensis*; g, *speciosus*; h, *elegans*. (Según H. SCHMIDT.)

Sin embargo, no todos los fósiles que caracterizan niveles estratigráficos sucesivos son los términos de una serie evolutiva. La ma-

seres vivos han *variado* en el transcurso del tiempo y si ha de mantenerse la ley fundamental biológica de que todo ser vivo procede por generación natural de otro u otros que le han precedido, la única solución posible para coordinar estas dos realidades es que los seres vivos han *evolucionado*. Pero, además, existen innumerables "pruebas" del proceso, unas de índole paleontológica, que son las más demostrativas, otras procedentes de la genética y de la biogeografía, otras,

GEOLOGIA HISTORICA

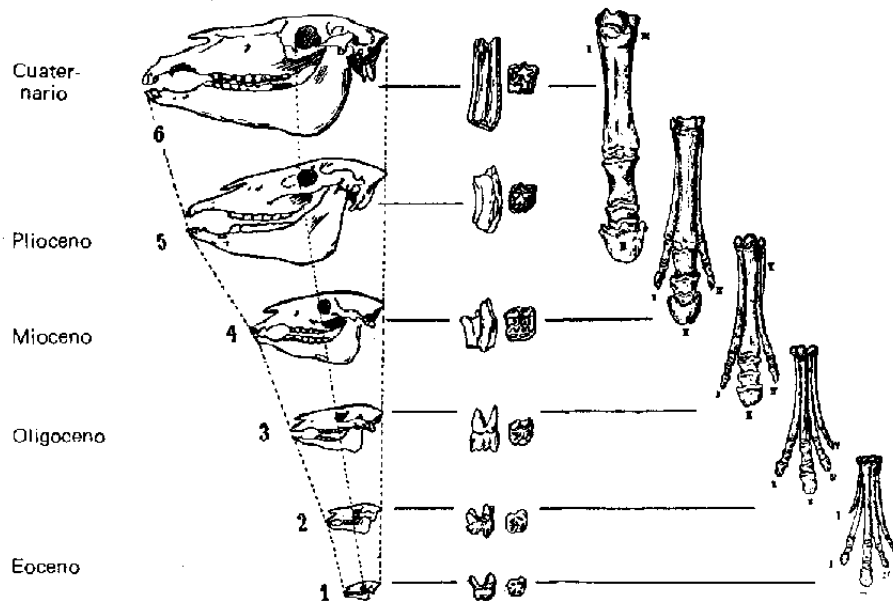


Fig. XX-15.—La evolución de los *Equidos* en Norteamérica durante la Era Terciaria ha dado lugar a una serie de formas fósiles, que caracterizan cada una de las divisiones estratigráficas correspondientes a las épocas en que vivieron: 1, *Eohippus*; 2, *Orohippus*; 3, *Mesohippus*; 4, *Merychippus*; 5, *Pliohippus*; 6, *Equus* (caballo actual). En el curso de la evolución de los *Equidos* se puede observar el aumento general de talla; la reducción progresiva de los dedos laterales de sus extremidades; el aumento en longitud de los molares (que adoptan forma prismática al final de la serie) y su progresiva complicación en el esmalte. (Todos los dibujos de cada serie, a la misma escala: a la izquierda, *cráneos*; en el centro, *molares*, y a la derecha, *extremidades posteriores*.) (Según OSBORN.)

por último, de la anatomía y fisiología comparadas. No es posible, en una obra de carácter tan general como ésta, entrar en detalles sobre esta cuestión, pero existe una amplia bibliografía sobre el tema de la evolución, que puede ser consultada por quien se interese en ello.

Una de las principales adquisiciones de la Paleontología, quizá su mayor éxito, ha sido la reconstrucción de la filogenia de los Vertebrados, según la serie Peces-Anfibios, Reptiles-Mamíferos, en cuya cúspide final se encuentra el hombre. La evolución no ha sido un proceso *casual*; ha obedecido a determinadas leyes biológicas que le han "encauzado" para que en último término apareciese el hombre: ésta ha sido su "finalidad". Se comprende que un tema tan trascendental, como es el del origen de los seres vivos, y aun de nuestro propio origen, tenga implicaciones filosóficas y teológicas y que haya dado lugar a interminables polémicas que, afortunadamente, se pueden ya dar como definitivamente superadas.

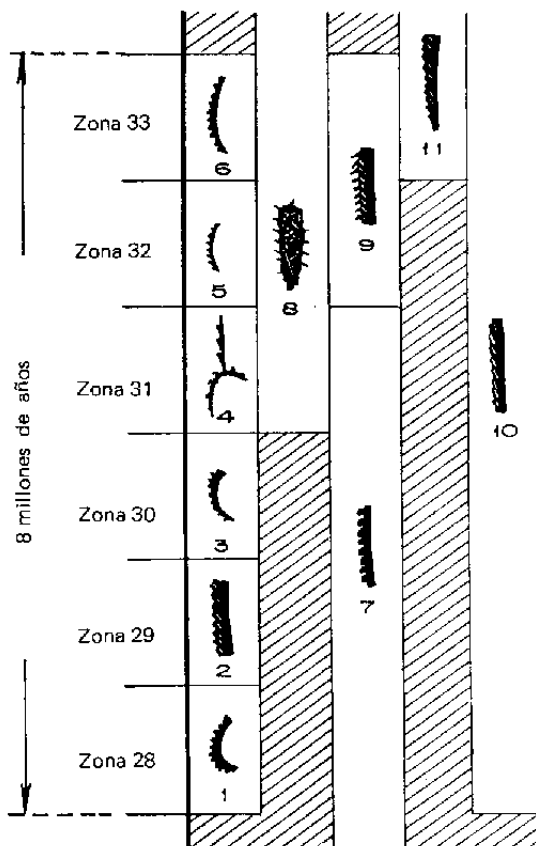
Recomendamos la consulta de la obra *La Evolución*, de CRUSAFONT-MELÉNDEZ AGUIRRE, publicada por la B. A. C., 2.ª ed., Madrid, 1973.

BIOZONAS

yoría de las veces, la aparición y desaparición “brusca” de los fósiles en los estratos se debe a procesos de *migración*, es decir, a cambios del área geográfica de dispersión de las especies, que en un momento determinado invaden una cierta región, en donde sus fósiles empiezan entonces a ser “característicos”. Mediante estos fósiles se llegan a establecer divisiones estratigráficas muy finas, hasta de un millón de años de duración, que son las llamadas “biozonas estratigráficas”, y vienen definidas por determinados fósiles que se encuentran exclusivamente en cada una de ellas (fig. XX-16).

Fig. XX-16.—Ejemplo de “zonas estratigráficas” en el Silúrico superior, caracterizadas por distintas especies de *Graptolitos*. Cada una de estas “zonas” abarca algo más de un millón de años; las especies de *Graptolitos* que se suceden en la columna de la izquierda (1-6) no derivan unas de otras, aunque son las utilizadas para definir cada “zona”. Las especies 1-6 definen zonas; en cambio, las especies 7-10 definen tramos.

1, *Cyrtograptus murchisoni*; 2, *Monograptus riccartonensis*; 3, *Cyrtograptus symmetricus*; 4, *Cyrt. linnarssoni*; 5, *Cyrtograptus rigidus*; 6, *Cyrtograptus landgreni*; 7, *Monograptus priodon*; 8, *Gothograptus spinosus*; 9, *Monograptus flemingi*; 10, *Mon. dubius*; 11, *Monograptus vulgaris*. (Según BUBNOFF.)



Las condiciones que deben reunir los buenos fósiles característicos o “fósiles guía” son:



GEOLÓGICA HISTÓRICA

a) *evolución rápida*, para que varíen mucho en poco tiempo y sólo se encuentren en número muy reducido de estratos;

b) *amplia dispersión geográfica*, para que se encuentren en yacimientos distanciados, de tal forma, que puedan ser útiles para caracterizar niveles estratigráficos, por lo menos en el ámbito regional, y a ser posible con dispersión a escala continental;

c) que se trate de grupos biológicos muy difundidos y *abundantes*, para que sus fósiles se encuentren realmente en la mayoría de los yacimientos, ya que no serían de gran utilidad los grupos biológicos que, cumpliendo las anteriores condiciones, fosilizasen con dificultad. Por ello son fósiles muy importantes en Estratigrafía, los Moluscos, los Braquiópodos, los Trilobites, los Equínidos, los Foraminíferos, etc., por reunir las tres condiciones antes indicadas.

	Namuriense			Westfaliense				Estefaniense			Autuniense inferior
	A	B	C	A	B	C	D	A	B	C	
<i>Calamites suckowi</i>	[Thick horizontal line across all columns]										
<i>Neuropteris cordata</i>								[Thick horizontal line across Estefaniense A, B, C]			
" <i>scheuchzeri</i>								[Thick horizontal line across Estefaniense A, B, C]			
<i>Pecopteris lepidorachis</i>								[Thick horizontal line across Estefaniense A, B, C]			
" <i>arborescens</i>								[Thick horizontal line across Estefaniense A, B, C]			
<i>Alethopteris davreuxi</i>								[Thick horizontal line across Estefaniense A, B, C]			
<i>Sigillaria elongata</i>				[Thick horizontal line across Westfaliense A, B, C, D]							
" <i>davreuxi</i>				[Thick horizontal line across Westfaliense A, B, C, D]							
" <i>mammillaris</i>				[Thick horizontal line across Westfaliense A, B, C, D]							

Fig. XX-17.—La edad geológica exacta de un yacimiento, en el que se encuentra la asociación de fósiles vegetales indicada en la columna de la izquierda, se puede determinar comparando los períodos en que vivió cada especie (representados por las líneas de trazo grueso). Sin duda, la "edad geológica" de una tal asociación será la que resulte compatible para todos los fósiles hallados en el mismo yacimiento, que en el presente caso es el "Estefaniense A" (Carbonífero superior).

*Asociaciones de fósiles.*—Los fósiles no se suelen encontrar "aislados" en los estratos, sino que, en general, están asociados con otros fósiles contemporáneos. En estas condiciones, aunque ninguno de los fósiles presentes sea por sí mismo característico de un nivel estratigráfico definido, puede ocurrir que sí lo sea la asociación de todos. Cada especie fósil tiene un período propio de existencia, y la edad geológica del conjunto será la que sea compatible para todas las especies fósiles presentes (fig. XX-17).



## MICROPALEONTOLOGIA

### La Micropaleontología

No es raro que ciertas rocas, aparentemente estériles, contengan abundantes "microfósiles" (fig. XX-18), que suelen ser tan importantes como los "macrofósiles", tanto para un estudio paleobiológico como por tratarse de *fósiles característicos*.

En realidad, no existen diferencias fundamentales entre la Paleontología, que podríamos llamar "clásica", y la Micropaleontología, salvo en que el estudio de microfósiles requiere técnicas especiales de preparación y el empleo del microscopio. En general, los microfósiles son Protozoos (Foraminíferos, Radiolarios, Flagelados, etc.), pero hay otros muchos fósiles que, por su pequeño tamaño, pasan desapercibidos a simple vista, y su estudio entra ya en el campo de la Micropaleontología.

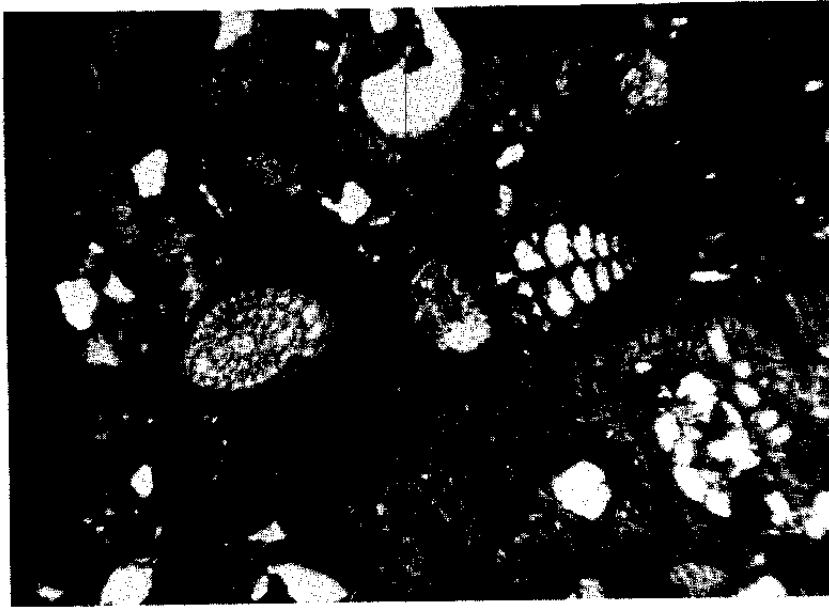


Fig. XX-18.—El estudio micropaleontológico de una roca sedimentaria puede resolver problemas estratigráficos allí donde falten los macrofósiles. Esta caliza, aparentemente estéril, tallada en lámina delgada y estudiada al microscopio, ha resultado de una gran riqueza en microfósiles, que han permitido determinar su edad geológica. En la fotografía aparecen secciones de diversos Microforaminíferos, principalmente un *Rotárido* (sección espiral) y una *Textularia* (sección biseriada); colonias de Briozoos y un alga calcárea, *Lithothamnium*. Esta caliza corresponde al Mioceno. (Microfotografía con luz natural,  $\times 60$ .)

## GEOLOGIA HISTORICA

Tales son, por ejemplo, los *Ostrácodos*, los *Conodontos*, las espiúculas de las Esponjas, las placas de ciertos Equinodermos, las mandíbulas de Gusanos y hasta los dientes de ciertos Mamíferos de pequeño tamaño, como los Insectívoros y algunos Roedores.

Para el estudio de los microfósiles, hay que separarlos de la roca que los contiene, triturándola, disgregándola en agua, o utilizando un generador de ultrasonido; también se pueden utilizar ácidos o álcalis, que disuelvan el cemento de la roca, aunque en este caso hay que proceder con cautela, porque también se deterioran los fósiles. Luego, los microfósiles, se separan utilizando tamices de mallas adecuadas a su tamaño, y una corriente de agua que arrastre la arcilla y las partículas resultantes de la disgregación de la roca. Cuando no sea posible disgregar la roca, o cuando no sea conveniente, para evitar la destrucción de los microfósiles, hay que recurrir al estudio en lámina delgada (fig. XX-18).

La *Palinología* se ocupa del estudio de microfósiles vegetales que, como las esporas y los granos de polen, se encuentran también asociados a las rocas sedimentarias e incluso al carbón.

En la actualidad, la Micropaleontología ha adquirido una gran importancia, por el hecho de haber resultado extraordinariamente eficaz en el estudio de muestras o "testigos", procedentes de sondeos realizados en la prospección del petróleo (págs. 345-347), donde no es frecuente encontrar "macrofósiles", siendo de enorme importancia determinar la edad geológica de los estratos atravesados por la sonda, en el subsuelo, y correlacionar los correspondientes a sondeos distintos. En estos casos, el estudio micropaleontológico resuelve el problema planteado, la mayoría de las veces.

### *Las facies estratigráficas.*

Recibe el nombre de *facies estratigráfica* el conjunto de caracteres que reflejan las condiciones ambientales o de sedimentación, en las que se formó la roca que constituye el estrato. Estas condiciones imprimen un carácter propio a los sedimentos acumulados (14), y, en consecuencia, también de la clase de roca que forme el estrato se podrán deducir aquéllas.

Además, en cada ambiente ecológico viven determinados animales y vegetales, cuyos fósiles, asociados a los sedimentos, se encuentran ahora en los estratos, contribuyendo a definir, aún con más precisión, la facies estratigráfica. Existen animales y vegetales, especialmente sensibles a los cambios de condiciones ambientales que son, precisamente, los buenos "fósiles de facies".

(14) Véase lo dicho sobre ambientes de sedimentación, en el Capítulo IX (páginas 244 y siguientes), los tipos de sedimentos y las rocas formadas.

FACIES ESTRATIGRAFICAS

De esta forma, en una facies estratigráfica hay que considerar la *litofacies* (conjunto de caracteres petrográficos) y la *biofacies* (definida por los caracteres paleontológicos), de cuya asociación se pueden llegar a conocer con exactitud las condiciones ambientales que existieron en la época en que se formó el estrato: distancia de la costa, velocidad de la corriente, turbulencia, temperatura, salinidad, etc.

*Tipos de facies.*—La clasificación de las facies estratigráficas es la misma que la de ambientes ecológicos actuales, o de aquellos en que se depositaron los sedimentos (14), que en esquema son los siguientes:

FACIES MARINAS .....	}	<i>litoral</i>	}	recifal	"flysch"
		<i>nerítica</i>		bentónica	
		<i>batial</i>		nectónica	
		<i>abisal</i>		pelágica	
				planctónica	(geosinclinal)
FACIES CONTINENTALES	}	<i>fluvial</i>	}	bentónica	
		<i>lacustre</i> .....		nectónica	
				planctónica	
		<i>glaciar</i>			
		<i>desértica</i>			
		<i>edíca</i>			
		<i>lagunar</i>			

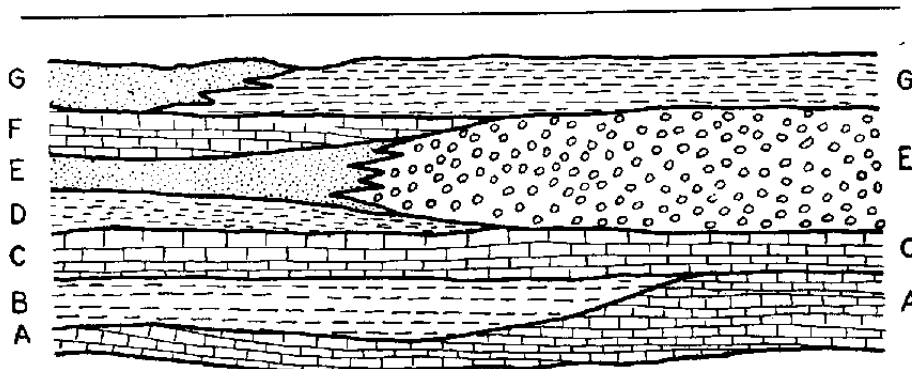


Fig. XX-19.—Los cambios laterales de facies dificultan la sincronización de dos series estratigráficas con *facies heterópicas*. Cuando se puede observar el paso de una facies a otra (como ocurre en la parte central del esquema), el problema se resuelve fácilmente, pero en el caso de no disponer sino de las dos series aisladas de los extremos, la equivalencia de los términos *D + E* con el *E'* habría de establecerse indirectamente, teniendo en cuenta que están limitados por los mismos términos de la serie: *C* y *G* (suponiendo previamente identificados *G* con *G'*). Los estratos *B* que no aparecen en la columna de la derecha se dice que han quedado "acuñados" entre los *A* y *C*.

## GEOLOGIA HISTORICA

En cada época se han depositado sedimentos en ambientes muy diversos, que han dado lugar a facies distintas, pero contemporáneas o *sincrónicas*. Facies *isópicas*, son las que corresponden al mismo ambiente, aunque no sean contemporáneas; y *heterópicas*, las formadas en ambientes distintos.

Las facies *heterópicas sincrónicas*, como son, por ejemplo, las que corresponden a rocas formadas en las regiones nerítica y batial del mismo mar, o al *biohermo*, que se desarrolla simultáneamente a la sedimentación de arcillas, dan lugar a cambios laterales de facies, pasándose insensiblemente de unas a otras, o bien de forma



Fig. XX-20. — Rizadas de corriente marina (*ripple-marks*), en las areniscas del Carbonífero (Estefaniense inferior), en el cauce del río Rubagón, entre Brañoseira y Barruelo (Palencia). (Foto: R. H. Wagner.)

más o menos brusca (fig. XX-19). Cuando se puede observar esta sustitución "lateral" de unas facies por otras, es fácil establecer el sincronismo de dos distintas; pero en el caso contrario—que suele ser el más frecuente—la sincronización de facies distintas tiene que resolverse por métodos indirectos o mediante criterios paleontológicos previamente establecidos.

634

### HUELLAS DE SUPERFICIE

*Huellas en la superficie de los estratos.*—En general, las superficies que separan dos estratos sucesivos son, aproximadamente, planas, pero en determinadas circunstancias la superficie del estrato presenta relieves característicos que pueden proporcionar datos complementarios de gran importancia, para una mejor interpretación de las facies a que corresponden.



Fig. XX-21.—Grietas de retracción en la cara superior de un estrato de caliza margosa, en el Lías de la costa del Sur de Gales. El estrato aparece dividido, además, por diaclasas perpendiculares, que limitan áreas groseramente rectangulares. (Foto: B. Meléndez.)

Estos relieves pueden ser de origen puramente mecánico, como las rizaduras de las corrientes de marea que se observan frecuentemente en las playas (véase la foto de la pág. 249), y dan origen a los llamados "ripple-marks", que a veces aparecen en las superficies de estratificación (fig. XX-20), o las grietas de retracción, formadas por desecación del barro (figs. XX-12 y XX-21). Un caso análogo lo constituyen las "escurriduras", que aparecen en relieve en ciertos estratos de arenisca, en el "flysch" (fig. XX-22).

En otras ocasiones se trata de auténticas "huellas" dejadas por el paso de animales sobre los sedimentos aún no consolidados, que

### GEOLOGIA HISTORICA

son especialmente abundantes en el "flysch" (fig. XX-23). Estas "huellas" o bien "pistas" de reptación, dejadas por animales, quedan *en hueco en la cara superior de los estratos* (fig. XX-12), formándose la "contrahuella" en *bajorrelieve, en la cara inferior* del estrato inmediatamente superpuesto. Esta disposición permite diferenciar la cara inferior de un estrato, de la superior, y establecer el orden primitivo de superposición, en el caso de que los estratos se presen-

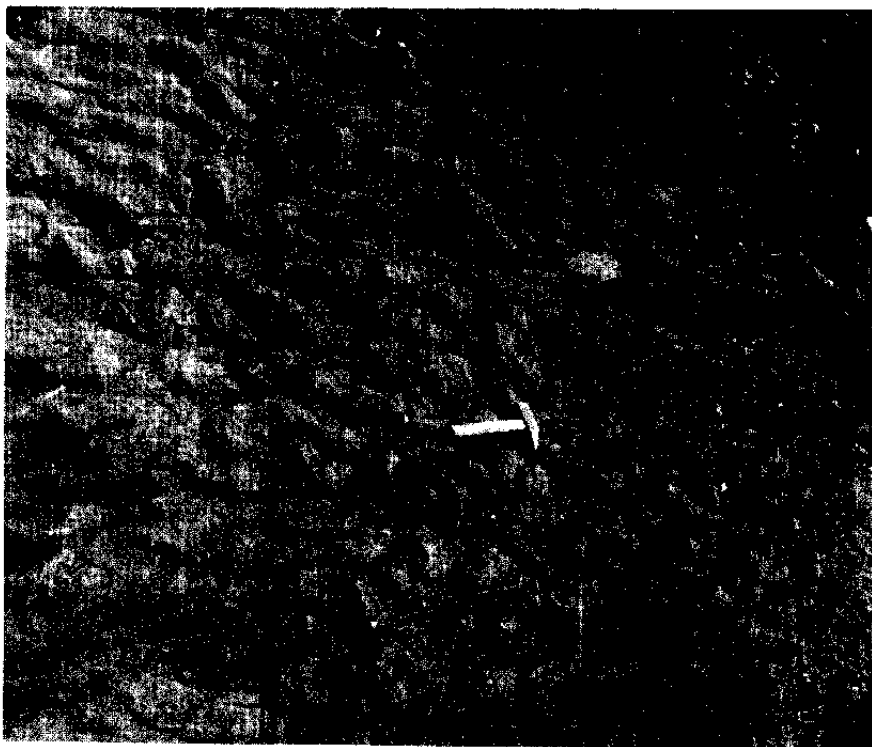


Fig. XX-22.—Huellas de "escurriduras" en la cara inferior de un estrato de arenisca, en la formación del "flysch" eoceno de Zarauz (Guipúzcoa). (Foto: B. Meléndez.)

## CORRELACION ESTRATIGRAFICA

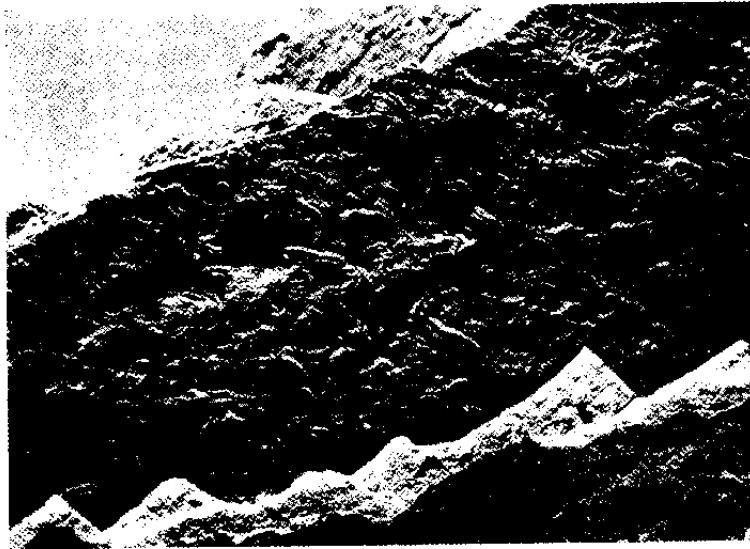


Fig. XX-23.—“Pistas” de reptación, sinuosas y en bajorrelieve (*Subphyllochorde*), en la cara inferior de un estrato de arenisca, en el “flysch” del Eoceno, en la playa de Santelmo (Zumaya, Guipúzcoa). (Foto: J. G. de Larena.)

ten verticales, o incluso en estratificación “invertida”, proporcionando al geólogo un criterio de gran importancia para la interpretación tectónica.

### *La correlación estratigráfica.*

El problema básico de la Estratigrafía es la identificación de los estratos, en series estratigráficas que no están en conexión directa; *correlacionar* estas series, determinando cuáles son los estratos formados contemporáneamente, es decir, reconstruir la serie estratigráfica, supliendo las discontinuidades que actualmente presenta.

Los criterios que pueden emplearse para resolver este problema de corre'ación son muy diversos, pero fundamentalmente se resumen en los dos siguientes:

a) *Criterio petrográfico.* Con frecuencia los estratos presentan caracteres propios que los hacen fácilmente identificables: tipo de



## GEOLOGIA HISTORICA

roca, presencia de ciertos minerales asociados al estrato, coloración, etcétera. Estos son los llamados "horizontes guía" de una formación estratificada (fig. XX-24), que sirven como puntos de referencia en la correlación a distancia. Por ejemplo, un *conglomerado* que forma la base de la serie estratigráfica; una *arenisca* que contenga granos de algún mineral pesado, resistente a la alteración; una *caliza de color rojo*, intercalada en una serie donde predominan los tonos grisáceos; un nivel de *pizarras negras*, intercalado en una serie caliza; pueden ser excelentes "horizontes guía" que faciliten la labor del geólogo, si tienen la necesaria continuidad en extensión, de forma que se repitan en distintas series de estratos.

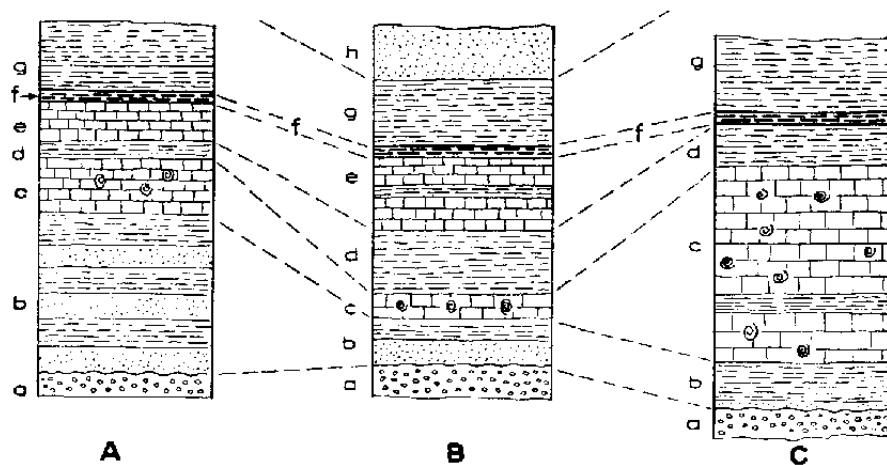


Fig. XX-24.—Correlación de tres "columnas" estratigráficas A, B, C, sin conexión directa. Para ello se utilizan los niveles "guía": a, conglomerado de base, y f, nivel de margas rojas, fácilmente identificables en las tres columnas. También se ha identificado el nivel c, de calizas fosilíferas, aunque en las tres columnas tiene desarrollo vertical distinto. Los otros niveles quedan definidos al estar comprendidos entre dos previamente identificados.

b) *Criterio paleontológico.* La presencia de "fósiles característicos" en un estrato proporciona el criterio más seguro para su correlación a distancia, con la enorme ventaja de que el nivel estratigráfico así definido puede reconocerse aunque presente acusadas diferencias litológicas, o aunque su potencia (o espesor) sea muy distinto en las series de estratos, como ocurre con el nivel c en la figura XX-24.

### CORRELACION ESTRATIGRAFICA

Sin embargo, este criterio paleontológico tiene sus limitaciones. En primer lugar, es preciso que los estratos contengan fósiles, pues de lo contrario es evidente que no podrá aplicarse. Con todo, el estudio micropaleontológico de los estratos suele proporcionar datos importantes, toda vez que, en rocas aparentemente estériles, no es raro encontrar microfósiles que permiten correlacionarlas con otras en sus mismas condiciones.

Cuando los fósiles hallados en un estrato no son lo bastante "característicos" para establecer inmediatamente su correlación con otros, se puede recurrir a métodos estadísticos utilizando fórmulas de *semejanza faunística*, que nos dan el "grado" de equivalencia entre dos estratos:

$$S = \frac{C}{N_1 + N_2 + C} \times 100$$

donde  $N_1$  y  $N_2$  representan el número de "especies" *distintas* (no comunes), contenidas en cada uno de los estratos, y  $C$  el número de "especies" comunes a ambos. Cuando todas las "especies" fósiles son comunes,  $S$  vale 100, lo cual equivale a *identidad estratigráfica*; en otro caso, tendrá un valor entre 0 y 100, tanto mayor cuanto más "equivalentes" sean las faunas fósiles de ambos estratos.

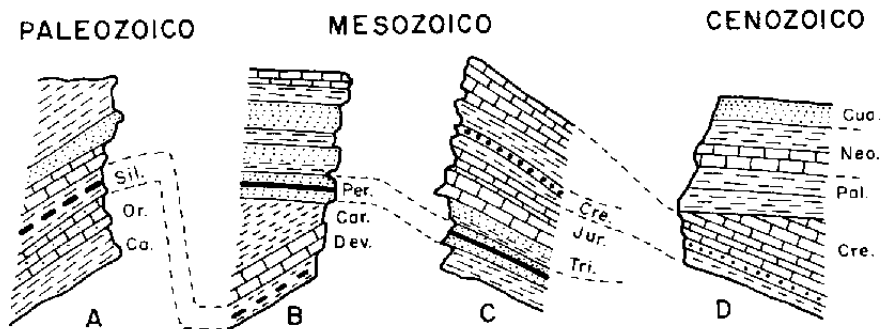


Fig. XX-25.—Las series estratigráficas accesibles en distintas localidades (A, B, C, D) se pueden correlacionar por la existencia de estratos que se repiten en unas y otras. Así es posible "empalmarlas" entre sí y llegar a establecer la columna estratigráfica "total".

Si se trata de correlacionar *facies heterópicas*, aunque sean contemporáneas, tendrán fósiles distintos, por tratarse de ambientes ecológicos diversos. En tal caso, la correlación no suele ser posible directamente, por no existir fósiles comunes, a menos que, de ante-

## GEOLOGÍA HISTÓRICA

mano, se conozca la "equivalencia" de ambas facies. En algunos casos pueden encontrarse *microfósiles planctónicos*, distribuidos en facies diversas, debido a que estos microorganismos, después de muertos, caen lo mismo sobre un tipo de sedimento que sobre otro, y en tal caso, la correlación es posible utilizando los recursos de la micropaleontología.

### *Integración de la serie estratigráfica.*

Las cuencas de sedimentación no han permanecido inmutables en el transcurso del tiempo, y han estado sometidas a movimientos epirogénicos y a fases orogénicas que han interrumpido la formación de estratos durante períodos, a veces muy dilatados. En consecuencia, no se encuentra en ninguna localidad la serie "completa" de sedimentos, que se habría acumulado en el transcurso de los tiempos geológicos, de haber sido continuo el proceso de sedimentación, existiendo siempre notables lagunas y discontinuidades que han de ser suplidas por el geólogo para llegar a reconstruir la serie estratigráfica total.

Además, aunque en alguna localidad desconocida la sedimentación hubiese sido ininterrumpida a lo largo de todas las Eras geológicas, esta región estará aún, actualmente, recubierta por el mar, resultando inasequible al geólogo, que sólo puede conocer la parte de la litosfera emergida y posteriormente erosionada.

Las series estratigráficas asequibles a la investigación son siempre parciales, y es necesario "empalmarlas", encajarlas entre sí, tomando como referencia los niveles estratigráficos que se repitan de unas en otras (fig. XX-25), hasta obtener la "columna estratigráfica" completa.

*Divisiones estratigráficas y cronológicas.*—A la par que se ha ido integrando la columna estratigráfica se han ido estableciendo "divisiones" en la misma, con diversos criterios, asignando nombres particulares a cada conjunto de estratos, de acuerdo con sus características petrográficas, o utilizando denominaciones locales que sirviesen para facilitar las descripciones estratigráficas.

Una de las más antiguas subdivisiones data del siglo XVII y fue establecida por ARDUINO, que divide la Historia de la Tierra en cuatro partes: un primer "orden" de *terrenos Primarios*, con pizarras, cuarcitas, mármoles y grauvacas, escasos en fósiles; encima de estos terrenos sitúa los *Secundarios*, abundantes en fósiles, con calizas, areniscas y margas; superpuestos a ellos sitúa los *terrenos Terciarios*, formados por calizas, areniscas, yesos y arcillas, muy ricos en

## CRONOLOGIA ABSOLUTA

fósiles, y, por último, los terrenos de aluvión, que corresponden al "orden" *Cuaternario*, los cuales se superponen a cualquiera de los anteriores. Esta división, a grandes rasgos, coincide con la corrientemente utilizada en las cuatro Eras: *Primaria*, *Secundaria*, *Terciaria* y *Cuaternaria*.

Luego, dentro de cada una de estas grandes divisiones de la Historia de la Tierra, se han ido estableciendo, poco a poco, otras subdivisiones menores que son los *sistemas*; éstos se subdividen a su vez en *series*, *pisos* y *tramos*. La división estratigráfica más fina a que normalmente se llega es la *zona*, que es el conjunto de estratos caracterizados por una especie fósil que persiste en ellos y que le da nombre (véase la fig. XX-16).

A cada división estratigráfica corresponde un término en la división cronológica, que indica su edad geológica en la siguiente forma:

<i>Divisiones estratigráficas</i>	<i>Divisiones cronológicas</i>
<i>Grupo</i> (p. ej., Paleozoico)	<i>Era</i> (Primaria)
<i>Sistema</i> (p. ej., Cámbrico)	<i>Período</i> (Cámbrico)
<i>Serie</i> (p. ej., Lias)	<i>Epoca</i> (Liásica)
<i>Piso</i> (p. ej., Retiense)	<i>Edad</i> (Retiense)
<i>Tramo</i> (15)	<i>Edad</i>
<i>Zona</i> (p. ej., del <i>Hildoceras bifrons</i> )	<i>Sécula</i>

### *Cronología absoluta.*

En diversas ocasiones, los geólogos han intentado calcular el tiempo en años necesario para la formación de un determinado espesor de estratos, tomando como punto de comparación el tiempo que, experimentalmente, se necesita para el depósito de un determinado espesor de sedimentos. Pero este método adolece de dos defectos fundamentales: por una parte, la mayoría de los estratos, después de haber estado sometidos a elevadas presiones en zonas profundas de la litosfera, han disminuido mucho de espesor; además, la velocidad de sedimentación es extraordinariamente variable. En ocasiones, en una crecida de un río se acumulan notables espesores de sedimentos en unos días (véase la foto de la pag. 246), pero en condiciones normales, sin crecidas, harían falta muchos años para que se acumulase el mismo espesor de sedimentos. Lo

(15) Un *tramo* comprende varias *zonas* estratigráficas, y suele venir definido por la presencia de un fósil determinado o por un carácter litológico especial. Por ejemplo, el "tramo" de *Calymene tristani* (un Trilobites), en el Ordovícico, que comprende varias zonas definidas por diferentes especies de Graptolitos. Véase también la figura XX-16.

## GEOLOGIA HISTORICA

mismo ocurre en las regiones marinas próximas a la costa, donde la acumulación de sedimentos depende de los aportes fluviales, que varían mucho a lo largo del tiempo.

Sólo en el caso de una sedimentación rítmica, si previamente se conoce este ritmo, como es el caso de las *varvas* glaciares, se puede evaluar en años el tiempo necesario para su depósito (véase la página 139).

*Métodos radiactivos.*—La solución del problema que plantea la determinación de edades geológicas absolutas en millones de años, sólo ha podido resolverse, con una precisión aceptable, a base de la presencia de minerales radiactivos (de *uranio*, de *torio*, etc.) en las rocas que forman la corteza terrestre.

En efecto, los *elementos radiactivos* sufren una desintegración espontánea, a ritmo constante, dando lugar, después de una serie de transformaciones, a elementos estables que se van concentrando en los minerales o en las rocas correspondientes, a medida que disminuye la cantidad del elemento en vías de desintegración. La “velocidad” con que se desarrolla el proceso puede ser determinada experimentalmente: se denomina *período de semidesintegración*, al tiempo que un elemento radiactivo necesita para reducir su masa a la mitad; estos períodos son muy variables, según el elemento de que se trate, y sirven para determinar—mediante una simple proporción—el tiempo transcurrido desde que se formó el mineral que contenga al elemento radiactivo (16).

La limitación de este método consiste, principalmente, en que las rocas ígneas no se encuentran “intercaladas” entre las rocas sedimentarias, en los niveles justos deseables para poder determinar, exactamente, la duración de cada división estratigráfica, que serían los límites precisos entre cada dos divisiones consecutivas. Además, muchas veces ni siquiera sabemos con certeza el nivel estratigráfico “límite” entre dos divisiones sucesivas, previamente establecidas con criterios muy variados, y entre las que pueden existir notables “lagunas estratigráficas”. Por eso, las cifras comúnmente dadas están siempre sujetas a revisión, aunque ya disponemos de una cronología absoluta aceptable, en términos generales, tal como aparece en el cuadro de la pág. 35, y más detallada en el que se incluye al final del libro.

El método más corrientemente utilizado se basa en el estudio de los minerales de *uranio*, contenidos en las rocas ígneas, que se suponen de “primera formación”; el *uranio-238* da como producto fi-

---

(16) La determinación de las proporciones de isótopos se realiza corrientemente utilizando un espectrógrafo de masas.

## CRONOLOGIA ABSOLUTA

nal de su desintegración *plomo-206*, y dosificando la proporción  $U^{238}/Pb^{206}$  se puede calcular con bastante aproximación la edad de la roca ígnea en millones de años (17).

Otro método empleado es la dosificación de ciertos isótopos. Ocu-  
rre, por ejemplo, que el *rubidio-87* se transforma espontáneamente  
en *estroncio* de su mismo peso atómico; de esta forma, la relación  
 $Sr-87/Rb-87$ , es un verdadero cronómetro geológico. Sin embargo,  
este método, aunque en teoría será aplicable a las rocas sedimenta-  
rias, está aún poco desarrollado, porque no hay minerales de *rubidio*  
en la naturaleza.

El *rubidio* se encuentra asociado, principalmente, a los minerales que  
contienen potasio, por lo que las mediciones se realizan corrientemente en  
*moscovita*, *lepidolita*, *flogopita*, *ortoclasas* y *anfíboles potásicos*. Entre los  
minerales asociados a las rocas sedimentarias, se pueden utilizar la *glau-*  
*conita*, la *illita* y la *silvinita*.

En las formaciones geológicas modernas, la disintegración de un  
isótopo radiactivo del *potasio*, *K-40*, que espontáneamente se trans-  
forma en otro isótopo del *argon*, *Ar-40*, permite determinar la edad  
absoluta mediante la relación entre ambos:  $Ar-40/K-40$ .

El período de semidesintegración del *potasio-40*, que es de 1.310 millones  
de años, permite, en teoría, medir edades desde 300.000 años hasta 3.000  
millones de años, pero por ser el *argon* un gas que se disipa a temperaturas  
elevadas, no se puede aplicar este método a las rocas o minerales que hayan  
sufrido los efectos del metamorfismo, por cuya razón se emplea, sobre todo,  
para datar los terrenos mesozoicos y terciarios.

Este método es uno de los más generalmente empleados en la  
actualidad, por ser el *potasio* uno de los elementos más frecuentes  
en las rocas, y porque el *argon* es un gas inerte, que no se combina  
con otros elementos, pudiendo aplicarse no sólo a minerales aisla-  
dos sino a rocas completas, como la obsidiana, que no tienen dife-  
renciados los minerales.

Para las formaciones geológicas más recientes se emplea otro mé-  
todo a base de un isótopo radiactivo del *carbono*, el *C-14*, existente

(17) El período de semidesintegración del *uranio-238* es de  $4,56 \times 10^9$  años.  
El uranio suele ir mezclado con *thorio*, cuyo período de semidesintegración es  
de  $7,13 \times 10^8$  años, el cual da como producto final de su desintegración *plomo-*  
*208*. En estas condiciones, la fórmula generalmente más aceptada para el cálculo  
de la edad absoluta de un mineral que contenga *uranio* y *thorio* es:

$$T \text{ (en millones de años)} = \frac{7.230 \times (Pb^{206} + Pb^{208})}{0,933 U + 0,322 Th}$$

## GEOLOGIA HISTORICA

en el anhídrido carbónico del aire en una pequeña proporción frente al  $C-12$  normal. Al parecer, en las altas regiones de la atmósfera se forma  $C-14$ , partir del  $N-14$ , por la acción de los rayos cósmicos, a un ritmo constante. Pero el  $C-14$  no es estable, sino que se desintegra con un período de semidesintegración de unos 5.730 años, llegándose a un equilibrio de la relación  $C-12/C-14$ , que permanece constante en la atmósfera. En cambio, el carbono asimilado por las plantas, mediante la función clorofílica, si bien en un principio tenía la misma proporción de isótopos que el anhídrido carbónico atmosférico, dicha proporción se altera por pérdida de  $C-14$ , que se desintegra y ya no se recupera. Por ello, dosificando cuidadosamente su proporción actual, se puede saber la edad en años de un resto orgánico que aún contenga carbono, como son: la madera, la turba, los huesos, etc.

La principal limitación de este método, que es de extraordinaria exactitud, consiste en la corta *vida media del Carbono-14*, que no permite determinar edades geológicas más allá de los 70.000 años (18).

El método del *Torio/Uranio* se basa en la presencia de U-234 en los esqueletos calcáreos de Invertebrados marinos, que después de muerto el animal se transforma progresivamente en Th-230. Aunque este método no está aún perfeccionado, las medidas realizadas concuerdan con las del  $C-14$ .

### *Trazas de partículas nucleares.*

Recientemente se ha empezado a emplear otro método para determinar edades absolutas, basado en los impactos producidos por las partículas nucleares, resultantes de la desintegración del *Uranio-238*, sobre la superficie de ciertos minerales, como son las micas, apatito, esfena, epidota, zircón, hornblenda, o sobre el vidrio volcá-

---

(18) La proporción inicial de  $C^{14}/C^{12}$  en el anhídrido carbónico atmosférico, es muy pequeño, del orden de  $10^{-12}$ . Además, por el proceso de desintegración del  $C-14$ , al cabo de 46.000 años, sólo queda 0,004 del  $C-14$  inicial.

Por este método se ha calculado la edad de ciertos objetos muy antiguos, cuya edad se conocía más o menos, como los contenidos en las tumbas faraónicas, habiéndose llegado a resultados de una sorprendente exactitud. Así se ha calculado la edad de ciertos fósiles prehistóricos, hasta el límite de los 50.000 años, habiéndose obtenido resultados en extremo interesantes, que nos han proporcionado una cronología aceptable para el Neolítico.

### INVERSIONES DEL CAMPO MAGNETICO

nico (19), cuyo número aumenta con el tiempo transcurrido, desde que se formó el mineral.

El número de impactos producidos, es proporcional al número de átomos de *uranio-238/cm<sup>3</sup>* existente en la muestra, que puede determinarse previamente, y aumenta con la edad del mineral, mediante una relación sencilla que permite determinarla, en función del número de impactos por *cm<sup>2</sup>*.

El método se ha empleado, especialmente, para determinar edades en el Pleistoceno, y presenta ciertas ventajas sobre los métodos radiométricos, pues aparte de su notable sencillez, se puede aplicar a materiales que hasta ahora no podían datarse directamente; además, se puede aplicar a ejemplares pequeños, incluso a secciones delgadas de rocas.

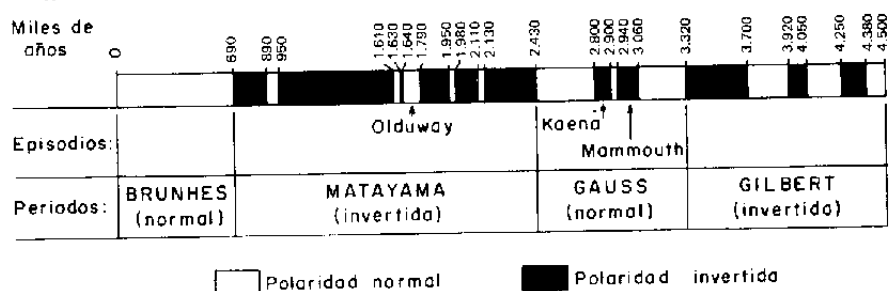


Fig. XX-26.—Cronología absoluta, establecida a base de las inversiones del campo magnético terrestre, que abarca los 4,5 millones de años últimos. (Véase la figura XIII-13). (Según A. Cox.)

#### *Inversiones del campo magnético.*

El hecho comprobado, de la inversión periódica del campo magnético terrestre, registrado como "paleomagnetismo", en ciertos minerales como la *magnetita* (véase la pág. 391), ha permitido establecer una serie de "bandas" en los basaltos del fondo oceánico, que presentan alternativamente, polaridad normal (como la actual) e invertida.

La transición de un período o época de polaridad magnética inversa a otro normal es de corta duración, con relación al tiempo en que ha persistido el estado de anormalidad magnética, por lo

(19) Las trazas del impacto de estas partículas nucleares, se ponen de manifiesto, tratando el mineral mediante ciertos reactivos que, como el ácido fosfórico calentado a 180°, atacan preferentemente a la zona del mineral que ha sufrido el impacto de la partícula nuclear.



### GEOLOGIA HISTORICA

que pueden obtenerse fechas muy aproximadas para estas inversiones de polaridad en la forma indicada en la fig. XX-26.

Cada período o época así definido se ve afectado por inversiones anormales de corta duración, llamados *episodios* o *eventos*. Así, por ejemplo, el período *Gauss*, de polaridad normal entre 3,32 y 2,43 millones de años, está cortado por dos episodios de polaridad inversa: el episodio de *Mammouth* puesto de manifiesto en el estudio de un basalto del lago Mammouth en California, cuyo comienzo se sitúa hacia los 3,06 m. a., y el episodio de *Kaena*, que comenzó hacia 2,90 m. a., cada uno con una duración aproximada de 100.000 años. Análogamente en el período de polaridad inversa *Matuyama*, se sitúan los episodios *Olduway* y *Gilsa*, de polaridad normal.

Determinada previamente la edad que corresponde a cada "banda", por mediciones radiométricas precisas (fig. XX-26), se puede *a posteriori* utilizar esta escala temporal, cuando en un basalto se pueda detectar la presencia de una de estas bandas, o una secuencia característica de las mismas, ya que su amplitud es proporcional al tiempo (véase la fig. XIII-13), con lo cual, disponemos de un método de cronología, aplicable en ciertos casos.