



EDITORIAL



APOLO

EDITORIAL



APOLO









INTRODUCCIÓN  
A LA GEOLOGIA







GH Natural  
42

P-5117

6690

# INTRODUCCIÓN A LA GEOLOGIA

POR

L. SOLÉ SABARÍS

Profesor de Geografía física y Geología,  
en la Universidad de Barcelona. Catedrático  
de Geografía, en el Instituto-Escuela,  
de la misma ciudad.



EDITORIAL APOLO  
Pasaje Marimón, 7  
BARCELONA

**Derechos reservados  
para todos los países.  
Copyright, Editorial  
Apolo, 1938.  
Printed in Spain.**

---

TIPOGRAFIA CATALANA E. C. - VIC, 16 - TELÉFONO 73733 - BARCELONA



## PRÓLOGO

*Me pide el Autor que escriba un prólogo para su GEOLOGÍA. Yo sé que no le necesita, pues el buen paño en el arca se vende y esta obra está hecha con el de mejor calidad, ya que es libro que por sí sólo se alaba y no precisa voceros. Tampoco al Autor le hacen falta presentadores, ya que es conocido en casa y fuera de casa y tenido muy justamente en alta consideración por geólogos nacionales y extranjeros. No obstante, acepto gustoso el encargo, que es gran honor para mí y motivo de honda satisfacción; pues nada hay que la produzca mayor, en quien ha encanecido en el Magisterio, que el ver a sus discípulos colmando las esperanzas que en ellos puso; que el saber que ha llegado el momento de verlos completamente formados, marchando por cuenta propia, y oír decir a los críticos: «Este ya no es una promesa, es una realidad». Los que vivimos la vida académica activa sabemos por experiencia con cuánta alegría se recibe el encargo de apadrinar al nuevo académico —quizá condiscípulo, probablemente compañero, y sobre todo si es discípulo—, en el solemne acto de ser recibido como miembro de la Corporación, y cuán honrados nos sentimos con él. Con alegría semejante escribo este prólogo, que considero como presentación, ante la Asamblea de autores de obras de Geología, de Luis Solé Sabarís, uno de mis*

**TIFFEN** Color Control Patches

mejores y más queridos discípulos, el más asiduo de mis colaboradores, asociando al suyo mi nombre en una obra didáctica, como lo he hecho ya en otras ocasiones y obras de investigación.

La aparición de un nuevo libro de Geología en español es siempre bien recibida por nuestros geólogos y naturalistas. Aun recuerdo con qué pena veía yo los primeros tiempos que siguieron a la terminación de mi carrera, cuando, precisado a preparar y reunir bibliografía para empezar mi formación científica, me encontré con que no había más que dos obras de Geología general (una, escrita en catalán), excesivamente anticuada una de ellas y tan elemental la otra, que no podían servirme para ordenar, primero, y menos para aumentar, después, los conocimientos necesarios para mis primeras oposiciones. Afortunadamente el panorama ha cambiado: en 1925 publicó la Editorial Marín una Geología escrita por el Prof. P. Ferrando y Mas (Cristalografía y Mineralogía) y por mí (Geografía Física, Petrografía, Estratigrafía, Paleontología y Geología Histórica); en 1927 apareció un Manual de Geología escrito por los mismos profesores, destinado a los cursos de Geología del Bachillerato llamado entonces Universitario, y en 1931 salió de la imprenta otro Manual de Geología del que soy autor y del cual acaba de publicarse la tercera edición. En este período fueron impresas otras obras meritorias de Geología elemental, debidas a los profesores Cendrero, Fernández Navarro, Arévalo, Alvarado, Darder, Fábregas y Puig de la Bellacasa, y ahora Luis Solé Sabarís nos proporciona otra nueva; bien venida sea. Yo sé que ha de ser excelentemente acogida y auguro al autor la alegría de ver pronto de ella repetidas ediciones.

Si el lector de esta GEOLOGÍA está preparado para poder juzgar y conocer las obras análogas españolas, re-

conocerá inmediatamente que no se trata de una obra más, sino que se destaca de entre ellas por su originalidad, así de fondo como de método y exposición, y difiere notablemente de las precedentes en el desarrollo, contenido e ilustración. Quizá note quien la lea, en algunas partes, ciertas analogías con mi Manual de Geología; pero eso a nadie debe sorprender, pues a mi lado se ha formado el autor, mi léxico geológico es el que primero llegó a sus oídos y difícilmente podrá desprenderse de lo que adquirió en la época en que más grabados quedan los conceptos y los modos de expresarlos; no obstante, como, por razones diversas procuró él y le aconsejé yo, Solé Sabarís ha seguido distintos rumbos de especialización dentro de la Ciencia Geológica, en su obra se manifiesta claramente una personalidad propia, así como una gran capacidad asimiladora y la vocación y profunda preparación científica y didáctica del autor, que ha sabido poner al alcance de los menos preparados las complicadas y difíciles teorías de la Geodinámica interna y otras cuestiones que el lector verá magistralmente desarrolladas en la obra. Tienen especial interés los capítulos dedicados a teorías orogénicas, a Geomorfología, a Paleobiología y a la constitución e historia geológicas del solar hispánico. En el primero se explican teorías novísimas que no habían sido expuestas en ninguna obra elemental escrita en nuestro idioma; la Paleobiología se trata por primera vez en obras españolas de esta clase, y en el dedicado a la constitución, origen e historia geológica de nuestra Península hace el autor un interesantísimo resumen de los conocimientos que sobre estas cuestiones se tienen en la actualidad; resumen original, mucho más completo, profundo y de acuerdo con las modernas concepciones, teorías y opiniones que los aparecidos en otras obras.

*El libro será de gran utilidad, tanto para nuestros escolares como para las personas estudiosas que deseen adquirir sólida cultura general. Felicito al Autor desde estas páginas, por el acierto que ha tenido en la presentación y desarrollo de la obra, y hago votos para que sea ésta para él el punto inicial de una larga serie de éxitos como el que la publicación de este libro representa.*

*Barcelona, 3 de abril de 1938.*

M. SAN MIGUEL DE LA CÁMARA

## INTRODUCCIÓN

### **El conocimiento de la Tierra**

La Geología, ciencia que por definición tiene por objeto el estudio de la Tierra, es decir, su origen y evolución, es de época muy reciente, pues no se constituyó hasta mediados del siglo pasado, cuando la mayoría de las ciencias de la Naturaleza hacía ya muchos lustros que formaban un cuerpo de doctrina definido y netamente estructurado.

Sin duda alguna, ha contribuido a este retraso el vigoroso esfuerzo imaginativo que el hombre ha tenido que realizar para admitir como verdades inconcusas hechos que vienen aparentemente desvirtuados por la observación cotidiana de ciertos fenómenos de la Naturaleza. El observador que por vez primera se disponga a meditar sobre las ideas que pueda sugerirle la contemplación de un vasto paisaje terrestre, difícilmente llegará a vislumbrar la actividad vital que se desenvuelve lentamente bajo sus plantas. La insignificancia del arroyo que se desliza mansamente, y aun la actividad espectacular del volcán, muy localizadas, apenas lograrán empañar la noción de estabilidad, de cosa definitiva y duradera, que de la configuración de la faz del mundo llevamos hondamente arraigada y hecha carne en nuestro cerebro.

Y es que de ordinario tendemos a una interpretación egocentrista de los hechos que se desarrollan a nuestro alrededor; es la concepción bíblica de la Tierra y del firmamento al servicio del hombre. Incluso para los atractivos más vivos y obsesionantes que ha tenido la Humanidad, como sin duda habrá sido siempre la contemplación de la bóveda celeste, sólo al cabo de estudios incesantes y de discusiones apasionadas se llega a eliminar esta posición inicial desorbitada. ¡Qué es-

fuerzo no habrá costado a la ciencia llegar a identificar este Sol, «alma de todo el mundo, o mejor, su espíritu; principio regulador y divinidad principal de la Naturaleza», como diría Plinio, como uno de los millares de soles aparentemente insignificantes que salpican centelleantes el cielo estival! ¡Qué paradoja más absurda la del movimiento orbicular de la Tierra alrededor del astro que nos parece que se desplaza todos los días sobre nuestro suelo aparentemente inmóvil! Y en el campo de la Geología, ¡qué esfuerzo de comprensión se necesita para llegar a admitir la movilidad constante de lo que por antonomasia llamamos tierra firme y el cambio incesante de la configuración de nuestro planeta, las mutaciones bruscas o lentas que ininterrumpidamente experimentan tierras y mares! ¡Qué esfuerzo imaginativo requiere el descubrimiento de continentes desaparecidos o de océanos convertidos en ingentes cordilleras! ¡Qué caudal de observaciones ha tenido que acumular la inteligencia para llegar a rehacer con los escasos y casi ilegibles documentos esparcidos por nuestro suelo, como son los sedimentos visibles en la superficie de los continentes y unos pocos restos de seres vivos petrificados, la geografía, la vida, el paisaje o el clima de un mundo desaparecido hace millones de siglos!

Ciencia, la Geología, resultante de la coordinación de la Física, la Química, la Biología y la Astronomía, marcha naturalmente retrasada con respecto a las demás ciencias experimentales; cada descubrimiento de una cualquiera de estas disciplinas, repercute intensamente en el campo de la Geología y con frecuencia sirve para ofrecer la perspectiva de un mundo nuevo a los ojos del geólogo. He aquí, también, sin duda, una de las causas por las que la Geología no ha alcanzado su madurez hasta el pleno desarrollo de aquellas otras ciencias auxiliares, y he aquí asimismo una de las razones del rápido y reciente progreso de las ciencias geológicas.

Sería, no obstante, un error creer que los fenómenos que se desenvuelven sobre la Tierra no han despertado siempre la curiosidad del hombre. Las manifestaciones majestuosas del vulcanismo, las catástrofes sísmicas, en cuanto de interés vital tienen para la Humanidad, han constituido una constante preocupación y un motivo



de estudio del mundo sabio. Estrabón, en una de las más bellas páginas de la literatura latina, describe casi con rigorismo científico una de las más catastróficas erupciones del Vesubio. En los mismos libros sagrados y en las creencias religiosas de algunos pueblos orientales, se trata de ciertos fenómenos naturales. Los egipcios, por ejemplo, creían que la Tierra había pasado por un estado de fluidez acuosa y admitían sucesivas generaciones y destrucciones alternantes de la superficie terrestre. Cuvier, el gran naturalista del siglo XIX, no hace más que remozar, modernizada, la teoría de los cataclismos sucesivos.

Pero no es eso solamente. En la ciencia griega, iniciada por Tales de Mileto (siglo VI a. de J. C.) se encuentran esbozados y en estado embrionario muchos de los aspectos de la ciencia geológica moderna. Espíritus dotados de extraordinaria capacidad, a la vez que observadores sagaces, llegan a entrever delicados matices de la actividad terrestre. Así, por ejemplo, Herodoto, en el siglo V antes de Cristo, explicaba casi en los términos con que lo haría un geólogo de hoy el origen del golfo de Egipto: «Por encima de Menfis, el intervalo entre dos cadenas de montañas es visiblemente a mis ojos un antiguo golfo de mar, como las tierras que rodean Ilien y Efeso, como la llanura de Meandro; algunos de los ríos que han depositado estos últimos aluviones son comparables al Nilo... Hay todavía ríos mucho menos considerables que el Nilo cuyo trabajo es notorio; el Aquelus, que desemboca en el mar de las Equinidas, ha unido ya al continente la mitad de estas islas... Creo que en su origen el Egipto ha podido ser un golfo de este género por el que penetraban hasta Etiopía las aguas del Mediterráneo... La prueba de este aserto me la suministran las conchas que se encuentran en las montañas, la salobridad y las eflorescencias salinas de las tierras... El suelo de Egipto es negro y deleznable légamo formado de aluviones arrastrados desde Etiopía por el río, mientras que el suelo de Libia es más rojo y arenoso y el de Arabia y Siria más arcilloso y pedregoso».

De la observación de esos fenómenos más ostensibles, nacen ya en la Antigüedad clásica las dos teorías que siglos más tarde habían de apasionar a los hombres de ciencia. La descripción de Herodoto acabada de trans-

cribir, así como las ideas preconizadas por Tales de Mileto, constituyen el germen de la teoría neptunista del siglo XVIII; en cambio, los escritos de Zenón (350-264 a. de J. C.) y otros autores impresionados por la magnitud de los fenómenos volcánicos, se decantan hacia la idea plutoniana. Los mismos cambios incessantes de la Tierra, «el eterno retornar» de Nietzsche, punto de partida de la geología moderna, se encuentran ya esbozados en Aristóteles (384-322 a. de J. C.), quien cree en un ritmo lento que determina la alternancia de tierras y mares. Estrabón mismo explana esta idea reconociendo la importancia que en la creación de los relieves tiene el fuego central manifestado a través de los volcanes y fuentes termales; ni más ni menos sustenta, en el siglo XIX, la Escuela de Leopoldo de Buch.

También se encuentran indicios de estudios paleontológicos en muchas obras antiguas. Las conchas marinas fosilizadas y otros restos de seres vivos, atrajeron la atención de hombres estudiosos. Estrabón, Xenofano de Colofón (siglo VI a. de J. C.), entre otros, descubren restos fósiles y les dan una interpretación plausible. Así Estrabón, el geógrafo y naturalista tantas veces citado, puede escribir sobre los Nummulites: «No creo deba pasar en silencio un caso singular que vi en las pirámides: son las acumulaciones de pequeños fragmentos pétreos que existen delante de estos monumentos. Son semejantes por su forma y tamaño a las lentejas; se diría que algunas están a medio desgranar. Se pretende que son los restos de la alimentación de los trabajadores, lo cual es inverosímil, porque también en mi país existe una colina, que se prolonga en medio de la llanura, cubierta de piedrecillas análogas a semejantes lentejas».

Sin embargo, ni estas notas esporádicas, y menos aún el largo eclipse del Medioevo, iluminado tan sólo por las ráfagas luminosas de la ciencia árabe, en la que sobresalen figuras interesadas en el conocimiento de la Tierra, como Avicena (siglos VIII-IX), significan un solo paso en firme para la constitución de nuestra ciencia, involucrada todavía en las teorías filosófico-cosmogónicas de la Antigüedad o en las supersticiones religiosas de la Edad Media. Así, por ejemplo, en 1669, cuando ciencias como la Física, la Astronomía, las Matemáticas y aun la Biología, gozan ya de persona-

lidad definida, Roberto de Berguen escribe sobre la esmeralda: «Conserva la castidad y descubre el adulterio, porque no puede sufrir la impudicia, rompiéndose espontáneamente, como lo hace entender el célebre Agrícola. Esta gema hace a las personas agradables, elocuentes y discretas».

En el siglo XVI, Bacon (1560-1626), con su obra crucial *NOVUM ORGANUM*, inicia una segunda etapa en el desarrollo de nuestra ciencia, al romper, después de una severa crítica, con las concepciones puramente imaginativas, y advoca, en esta feliz parte de su obra, por la experimentación y observación de la Naturaleza como únicas fuentes de estudio. Este renacimiento científico, secuela del Renacimiento literario y artístico, significa una revolución en el método de las ciencias experimentales y va seguido de un lento proceso constructivo de la ciencia geológica. Los datos aportados por la observación de numerosos hombres de ciencia, van desterrando poco a poco las supersticiones medievales, mientras la verdadera doctrina va abriéndose camino. Se multiplican las observaciones sobre fósiles, estratificación, rocas y minerales, especialmente en las prospecciones mineras. Como precursor de este periodo cabe citar, por su claro ingenio, a Leonardo da Vinci, ingeniero, arquitecto, pintor y poeta, el cual descubre unas huellas fósiles al abrir un canal en el Norte de Italia, y da de ellas la misma explicación que unos dos mil años antes habían dado Xenofano y Herodoto; redescubre, además, la importancia de la erosión fluvial. Los trabajos de Stenon (1638-1686), maestro de Anatomía en Padua, quien dibuja ya perfiles geológicos de los Apeninos; de Lázaro Moro, uno de los precursores de la Escuela plutoniana; de Martín Lister, autor del primer mapa geológico (1671); del abate José Cavanilles, eminente naturalista que estudió la región valenciana (1795); de los investigadores de las tierras americanas, entre los que destacan los estudios de Ulloa sobre las minas del Perú (1761), y de Bernardo Palissy, el artista admirable, que por amor a su oficio de alfarero acaba convirtiéndose en hombre de ciencia; al lado de las teorías desarrolladas por Leibnitz (1646-1716) y su precursor René Descartes, abren nuevos horizontes y aportan los materiales que han de constituir definitivamente la ciencia geológica.

La hora de la síntesis que había de dar forma a los estudios anteriores, nebulosos y esporádicos, se acerca. Es a comienzos del siglo XIX cuando Werner, Hutton y Cuvier convergen desde campos distintos y estructuran en verdadero cuerpo de doctrina los conocimientos hasta entonces dispersos. El alemán Abraham Werner, profesor de la Escuela de Minas de Friburgo, funda la Litología y da una primera división cronológica de la Tierra. El escocés James Hutton recapitula y estructura las actividades interiores de la Tierra; en su obra *Theory of the Earth*, como entonces se llamaba a la Geología, destacan los gérmenes de los modernos puntos de vista acerca de la constitución y evolución terrestres. Jorge Cuvier, eminente anatómico y destacada personalidad de su tiempo, al hacer el estudio organográfico comparativo de los seres vivos, crea la Paleontología. Finalmente, en 1823, Carlos Lyell, profesor del Colegio Real de Londres, da cima a la obra empezada con el Renacimiento y publica sus Principios de Geología, en la que ordena por vez primera los conocimientos geológicos y explana su fecunda teoría de las «causas actuales», según la cual todos los fenómenos que se han desarrollado durante la historia de la Tierra son análogos a los que se realizan ante nuestros ojos.

Y con esto, a mediados del siglo XIX, empieza la última fase de la evolución de la ciencia geológica, que toma ya los rumbos que tiene en la actualidad. Sus figuras destacadas son los padres de la Geología moderna: Eduardo Suess (1831-1914), el genial geólogo alemán que expone su concepción estructural de la Tierra; Carlos Zittel, con su magna síntesis paleontológica, y otros muchos, cuyas obras constituyen todavía la Biblia del geólogo y son obras de continua consulta en Seminarios y Laboratorios. Sin temor a exagerar, puede decirse que la geología sólo avanza ya en extensión.

Sin embargo, cabe aún reseñar una etapa final, verdaderamente renovadora. «La ciencia geológica está actualmente en un momento de gran interés; métodos nuevos de investigación, como son los sismológicos y los gravimétricos, conducen a concepciones nuevas acerca de la constitución interna de la Tierra y de las modificaciones de la superficie terrestre. Basta con

apuntar que la idea de desplazamientos de masas internas, haciendo que en el transcurso de las edades geológicas varíe la situación del ecuador y de los polos terrestres respecto a las masas continentales y oceánicas, abre nuevas orientaciones, que permiten explicar hechos geológicos y paleontológicos hasta ahora confirmados, pero inexplicados; se vislumbra que podrá evaluarse la duración de las diversas épocas de la vida de la Tierra. En Paleontología, el avance es grande, especialmente en lo que se refiere a Paleontología humana. Basta considerar los importantes descubrimientos realizados con las exploraciones y excavaciones de las cavernas habitadas por los hombres de los tiempos cuaternarios, y con el estudio de las pinturas trogloditas y rupestres... Pero esto no pertenece todavía a la Historia... Es el horizonte lejano hacia el cual se avanza por el camino penoso y glorioso de la investigación científica» (1).

### **Las ciencias geológicas**

La diversidad de materias que se agrupan bajo el denominador común de Geología, autoriza la división en una serie de secciones frecuentemente autónomas, conocidas con el nombre de Ciencias Geológicas.

Una de las ramas tiene por objeto estudiar el dinamismo de los fenómenos de la Tierra, acción de las aguas, del viento, terremotos, erupciones volcánicas, etcétera; es la Geología Dinámica, estrechamente emparentada con la Geografía Física. La diferencia entre estas dos disciplinas es parecida a la existente entre Meteorología y Climatología; la primera estudia la biología del fenómeno, mientras que la segunda atiende a las consecuencias que su repartición geográfica comporta. Afín a la Geología Dinámica es preciso situar a la novísima Geofísica, ciencia que apoyándose en los datos proporcionados por la Geología sirve de eslabón de enlace con la Cosmografía, ocupándose preferentemente de las particularidades del interior de la Tierra. Ocioso es destacar el interés enorme de esta rama de la ciencia geológica en las concepciones sobre el origen de las

---

(1) E. HERNÁNDEZ PACHECO. *La Geología y la Paleontología a través de la Historia*. Conf. Soc. Esp. Hist. Nat., 1927.

montañas y, en general, sobre todas las actividades que nacen en la endosfera terrestre.

Otras ciencias geológicas se ocupan de los aspectos estáticos de la corteza terrestre, es decir, de los materiales que la forman, rocas (Petrografía) y minerales (Mineralogía). Pero estas disciplinas, especialmente la última citada, tienen métodos propios y son más afines a las ciencias Físicoquímicas y por esta razón no serán tratadas en este Manual.

Por último, podemos indicar un tercer grupo interesado en el estudio de la historia de la Tierra, constituido por la Geología Histórica, en la cual se colocan la Estratigrafía, que se ocupa del orden de superposición de los materiales arrancados y arrastrados por las fuerzas que actúan en la superficie del Globo; la Paleontología, que determina la naturaleza de los seres que vivieron en otros tiempos y que, gracias a los restos esqueléticos que se encuentran entre los materiales terrestres, permite establecer la sucesión cronológica deseada por la Estratigrafía, y la Paleogeografía, que procura reconstruir la distribución de tierras y mares durante las pasadas épocas geológicas.



## CAPÍTULO PRIMERO

### GEOFÍSICA

#### CONSTITUCIÓN DE LA TIERRA

##### Los orígenes

El martillo del geólogo y el pico y la pala del minero han sido los instrumentos de disección que, al lado de los sondeos modernos y del microscopio petrográfico, han ido revelando poco a poco la estructura de la corteza terrestre. Pero ni el geólogo ni el minero han podido aportar jamás dato alguno sobre la naturaleza del interior de la Tierra, no obstante ser ese precisamente uno de los objetivos codiciados con mayor empeño. Y sin embargo, a pesar de tan burdo instrumental, se ha llegado a averiguar la naturaleza física y química del interior del Globo, casi con la misma exactitud y rigorismo científico con que el químico habría hecho en su laboratorio el análisis de unos fragmentos de la endosfera o con que el complicado aparato del físico hubiese podido revelar la densidad, temperatura, elasticidad, compresibilidad y otras particularidades de más difícil apreciación.

Por otra parte, el estudio de los meteoritos, masas rocosas de diversas dimensiones, que, procedentes de los espacios interplanetarios, atraviesan de vez en cuando estrepitosamente la atmósfera terrestre, indican que los astros de donde proceden son de la misma naturaleza que la Tierra. Al propio tiempo, el análisis espectral de los rayos solares y la física de los astros (1) han puesto en evidencia asimismo la identidad de composición y comunidad de origen de los diversos cuerpos del sistema solar. Una vez más, pues, en este campo

---

(1) Véase *Introducción a la Astronomía*. (Editorial APOLO.—Barcelona.)

maravilloso de la Cosmografía, la inteligencia humana ha predicho lo que después la observación ha confirmado plenamente. Así se ha venido en conocimiento de que la vieja teoría de Kant y Laplace, ideada en el siglo XVIII, sobre el origen de la Tierra, en cuanto se refiere a la procedencia solar de nuestro planeta reposa sobre datos contrastados experimentalmente.

Partiendo de este supuesto, se ha podido reconstruir las fases de evolución por las que ha pasado y aun por las que habrá de pasar el Globo terráqueo antes de llegar a su estado final, pues su evolución en nada difiere de la que se observa en los otros cuerpos celestes, y en este caso no es difícil encontrar astros en diversos estadios evolutivos que reproduzcan de una manera visible y seriada las fases de consolidación de la Tierra, desde el estado primitivo de nebulosa incandescente al de planeta inerte y desprovisto de toda manifestación vital como la Luna.

La masa gaseosa, el sol a elevada temperatura que formaría la nebulosa primaria, se iba enfriando por irradiación y contrayendo a la vez, mientras pasaba por una serie de estados parecidos a los que ofrecen algunos astros de luz roja, como Aldebarán y todas las llamadas estrellas gigantes. La contracción, seguida de aumento de calor, dió un vivo color blanco azulado a la nebulosa, tal como se observa en el Cisne, Sirio y otros cuerpos celestes, hasta pasar por una última etapa, luminosa y de mínimo volumen, igual a la que presentan las llamadas estrellas pigmeos de destellos rojizos. Como todo cuerpo celeste, al contraerse y perder calor por irradiación, llegaría a convertirse en una masa líquida o semiflúida, tal como hoy aparecen Júpiter y, especialmente, Saturno. Entonces los elementos que componen la Tierra, obedeciendo en dichas condiciones a su propio peso, debieron de disponerse en capas concéntricas, en orden creciente de densidades; los más pesados en el centro, los más ligeros en la superficie. Debido a los efectos del referido enfriamiento, seguramente se formó una primera costra de consolidación en la periferia, la cual flotaría a manera de escoria sobre el magma metálico fundido; costra inestable al principio y rota de continuo por la fuerza expansiva de la masa nuclear incandescente, pero que poco a poco aumentaba de grosor y se hacía cada vez



más y más estable. Con esto, la atmósfera, formada por los vapores ligeros de la envoltura externa, perdió el contacto con el núcleo incandescente, por lo que es de suponer que sufriría a su vez un enfriamiento rápido y una súbita condensación; un verdadero diluvio de agua caliente regaría entonces la superficie terrestre, constituyendo así un mar universal, el primer océano, que Suess llama la *Panthalasa*. En este instante, los primeros seres vivos pudieron poblar los mares de aquella época y empezar el desarrollo de la vida. Mientras tanto, bajo los efectos del enfriamiento nuclear y contracción sucesiva de la corteza, las primeras arrugas montañosas surcarían los mares y se inauguraría el juego incesante de los fenómenos geológicos; el oleaje, el viento, el hielo, los ríos y torrentes, atacarían con ímpetu el roquedal acabado de nacer y arrastrarían al fondo de los océanos los materiales arrancados, en donde se depositarían en espera del nuevo empuje de las fuerzas endógenas que habían de sacarlos a flor de agua. Así empieza la vida del Globo, mejor, de la superficie terrestre, tal como la entiende el geólogo; pero, con todo, un episodio tan sólo, a pesar de su duración casi incalculable, un instante quizá, del ciclo vital de la Tierra.

### Estructura y constitución del Globo terráqueo

La esfera terrestre puede, pues, ser considerada como formada por una serie de esferas concéntricas, la densidad de las cuales aumenta hacia el centro del sistema. Los componentes de estas envolturas reaccionan entre sí en las superficies de contacto, produciendo incesantes intercambios fisicoquímicos de muy diverso valor, pero que revisten gran intensidad en la superficie de la Tierra.

De fuera adentro comprende las siguientes capas concéntricas:

1.º La *Atmósfera*, envoltura gaseosa compuesta de un 78 por 100 de nitrógeno, 21 por 100 de oxígeno, 1 por 100 de argón, 0'03 por 100 de anhídrido carbónico y cantidades insignificantes de otros gases, además de una proporción muy variable de vapor de agua, que al condensarse origina las nubes. A causa de las corrientes de aire producidas por las diferencias de

temperatura del suelo, la composición de la parte baja de la atmósfera, en unos 11 kilómetros, es homogénea (*troposfera*; de *tropos*, movimiento). En cambio, a mayor altitud, hasta unos 30 kilómetros, donde no llegan estas perturbaciones térmicas, los gases que la forman se disponen en capas concéntricas (*estratosfera*; de *estrato*, capa). El espesor total que en todo caso se calcula para la envoltura gaseosa, es de unos 100 kilómetros.

2.º La *Hidrosfera*, envoltura líquida incompleta, formada por el agua de los mares y océanos, los cuales alcanzan una profundidad media de 4.700 metros. Se prolonga sobre los continentes formando la red fluvial y el agua de imbibición, jugando un papel importantísimo en el modelado del relieve terrestre y en los intercambios químicos entre la atmósfera y la Tierra.

3.º La *Litosfera*. Es la corteza rocosa y el campo de experimentación del geólogo. A medida que las particularidades del interior de nuestro planeta van siendo conocidas, se perfila más y más la noción de litosfera, que se ha visto corresponde a una zona periférica diferenciada que alcanza de 60 a 120 kilómetros de profundidad, en donde tienen asiento todos los fenómenos dinámicos que originan el modelado terrestre, no sólo los que nacen y se desarrollan en su superficie, como la acción del viento y de las aguas continentales, sino, incluso, los que proceden del interior, como los terremotos y volcanes.

4.º La *Endosfera*, núcleo estable e inactivo que comprende más de las tres cuartas partes de los 6.370 kilómetros del radio de la Tierra (1) y en donde los materiales pesados que la forman se disponen en orden creciente de densidades, de una forma análoga a lo que sucede en la estratosfera. A causa de su naturaleza se la designó también alguna vez por *barisfera*.

### La faz de la Tierra

Al observar en el Globo terráqueo la parte superficial y visible de la corteza, se nota en seguida lo redu-

(1) La figura de la Tierra es la de un elipsoide de revolución, cuyos radios tienen una diferencia de 21,5 km. en números redondos, siendo el valor del radio polar de 6.356.909 km. y el ecuatorial de 6.378.388. El valor medio del radio es el del de una esfera del mismo volumen que el elipsoide.

cido del dominio continental, pues sólo una tercera parte de la superficie aparece ocupada por tierras, en la proporción exacta de 1:2,6. Pero todavía llama más la atención la forma de las masas continentales, ensanchadas hacia el hemisferio Norte y adelgazadas progresivamente a medida que avanzan por los mares australes. Las tres cuartas partes de tierras se acumulan en el hemisferio boreal para formar un anillo alrededor del Polo, mientras en el hemisferio Sur desaparecen casi totalmente más allá de los 45°. Al propio tiempo, es fácil observar en las puntas aguzadas del Cabo de la Buena Esperanza y del Cabo Hornos, en las terminaciones meridionales de Africa y América, respectivamente, así como en los apéndices terminales de las penínsulas indias, una manifiesta desviación o torsión hacia el Este, como si las tierras estuviesen formadas por materiales plásticos y hubiesen quedado rezagadas en una hipotética traslación de los continentes en sentido contrario al de rotación de la Tierra.

Afinando un poco más la observación, se vería cómo encajan maravillosamente los entrantes y salientes de las tres grandes masas continentales, de forma que parecen retazos de una misma pieza separados después de haber sido caprichosamente recortados. La reconstrucción de este colosal rompecabezas no ofrece grandes dificultades. Las costas atlánticas de América encajan perfectamente con las de Europa y Africa; el Cabo de San Roque corresponde exactamente al Golfo de Guinea; las costas de América del Norte se ajustan también, en cierta manera, a las de Europa. Incluso, forzando un poco más la imaginación, no es difícil rellenar con la masa del continente australiano el vacío del océano Índico. La idea de la separación de un primitivo bloque continental único, la *Pangea*, surge de nuevo al contemplar el perfil de los continentes. Esta atrevida concepción, que desde hace tiempo fué sugerida con timidez, ha sido después sustentada valerosamente y avalada con poderosos argumentos por el audaz geólogo alemán Alfredo Wegener, muerto ha poco durante una expedición antártica en pos de nuevos datos para su tesis; pero el desarrollo de la teoría de las traslaciones continentales, como así se llama, está estrechamente engarzado con el origen de las montañas y será expuesto más adelante.

No menos instructivas resultan las consideraciones que pueden hacerse respecto al relieve de la corteza terrestre. El desnivel entre las cumbres más altas de la Tierra, el Everest (8.882 m.) y las simas más profundas, en Filipinas (Emden, 10.430 metros) alcanzan en números redondos 18.000 metros. Pero la proporción de alturas emergidas es muy inferior a la del dominio suboceánico, pues si los materiales de las montañas rellenasen los huecos de las hondonadas, los continentes quedarían reducidos a una plataforma de 700 metros de altitud, mientras que si hiciéramos lo propio con las desigualdades del relieve oceánico, el fondo alcanzaría el veril de 3.650 metros. La llamada curva



Fig. 1.—Curva hipsográfica.

hipsográfica (fig. 1) expresa bien claramente la desigual repartición de fosas y alturas en la corteza terrestre.

Resulta todavía de vivo interés esquematizar el arrumbamiento y repartición geográfica de los relieves más sobresalientes. Las conclusiones a que se llega pueden resumirse así:

1.º Las grandes cordilleras suelen surcar el borde de los continentes. Esto queda especialmente claro para el Pacífico, bordeado por los Andes, Sierra Madre y Montañas Rocosas, en América, y por las derivaciones del Himalaya, en Asia.

2.º Las grandes profundidades oceánicas corren adosadas y paralelas a las elevaciones ingentes. Así, el fondo del Pacífico constituye una plataforma que se hunde en los bordes para formar las grandes fosas americanas y asiáticas en donde se hallan las mayores depresiones oceánicas. El Atlántico está recorrido por

una larga elevación, a manera de espina dorsal, que va de Norte a Sur, mientras las profundidades máximas corren paralelas y próximas a las costas de América, Africa y Europa.

3.º Los relieves son disimétricos. Montañas y depresiones presentan un flanco escarpado y otro de pendiente suave; así, los Andes tienen abrupta la vertiente que da al Pacífico; el Himalaya aparece bruscamente cortado encima de la llanura del Indo.

4.º Se aprecia una señalada diferencia entre el Pacífico y el Atlántico, entre Europa y América. En las costas del Pacífico, las cordilleras corren paralelas al mar y aparecen jalonadas por volcanes que forman un círculo de fuego a su alrededor. En cambio, en el Atlántico, las cordilleras cortan perpendicularmente la costa (Pirineos, Alpes, etc.) y ésta no va acompañada forzosamente de regiones sísmicas ni volcánicas. Una vez más, pues, encontramos una destacada diferencia entre el Pacífico y el Atlántico, diferencia que más adelante el origen geológico nos explicará plenamente.

5.º Una profunda depresión, llamada *círculo mediterráneo*, corta las masas continentales; es una banda de hundimiento a la que acompañan invariablemente volcanes y terremotos. A esta banda corresponden las fosas de las Antillas y, en general, la depresión que separa América del Norte de América del Sur; se continúa luego en el Atlántico por la depresión transversal que separa Canarias de las Azores, volcánica también; penetra por el estrecho de Gibraltar en el Mediterráneo, bordeado asimismo de volcanes, y se divide en dos ramas, una meridional, que va a parar a las fosas del Pacífico a través del mar Rojo y del Golfo de Persia, y otra septentrional, que penetra en el Caspio. En esta banda se encuentran las cordilleras más elevadas, Alpes, Pirineos, Himalaya, etc. Parece como si fuese una enorme rotura, producida por torsión, en virtud de la cual las tierras situadas al Sur de esta faja se desviaron hacia el Este en aquel hipotético desplazamiento continental que sugiere la forma de los continentes.

### El interior de la Tierra

Las mayores perforaciones practicadas en la corteza terrestre, como las de Alta Silesia (2.239,72 m.), Virgi-

nia (2.310 m.), Pensilvania (2.258 m.) o los grandes túneles a través de los Alpes, han podido aportar conocimientos directos solamente sobre una parte insignificante del interior de la Tierra; poco más de 2 kilómetros, en los casos óptimos, sobre un radio de más de 6.000 kilómetros. Asimismo las lavas ardientes arrojadas por los volcanes se supone fundadamente que no proceden de profundidades mayores de 50 kilómetros. Las posibilidades, pues, de estudiar directamente la naturaleza de la endosfera terrestre han de ser completamente descartadas y jamás podrá soñarse en realizar el proyecto del campesino de Julio Verne, que quería excavar hasta el centro de la Tierra un gigantesco pozo que a la vez podría servir de calefacción central a toda la Humanidad.

En cambio, una serie de consideraciones geofísicas y de fenómenos geológicos han servido para investigar con gran precisión la naturaleza y propiedades del interior del Globo. La fuerza con que la Tierra atrae a los demás cuerpos, según las leyes de la gravitación universal, permite calcular el peso y densidad de los materiales del interior y substituye ventajosamente la balanza de precisión. La velocidad con que los terremotos se propagan por el interior de la Tierra y el aplastamiento polar, permiten juzgar acerca de la compresibilidad y elasticidad de las substancias del núcleo. La desviación de la vertical experimentada por la plomada cerca de las masas montañosas, ha servido también para calcular la densidad de la corteza. Los túneles y las grandes perforaciones mineras han permitido comprobar que la temperatura de la Tierra aumenta con la profundidad.

Dada la comunidad de origen de los cuerpos del sistema solar, el paralelismo establecido entre las distintas clases de meteoritos y las densidades de las diversas zonas de la Tierra suministradas por algunos de los procedimientos citados ha permitido conocer la composición química de la endosfera; los resultados obtenidos por métodos distintos concuerdan, y así, poco a poco, lo que parecía un problema poco menos que insoluble, se ha ido aclarando de tal forma que hoy constituye muy justamente una de las conquistas que más enorgullecen a la ciencia moderna.

### Composición del interior de la Tierra

Si la Tierra fuese homogénea, para obtener su peso bastaría multiplicar la densidad media de los materiales que se encuentran en su superficie por el volumen del Globo. Según todas las observaciones efectuadas, la densidad media de las rocas de la corteza varía entre 2 y 3, aceptándose ordinariamente como muy aproximado el valor 2,7-2,8. En cambio, cuantos cálculos y métodos se han empleado para investigar la densidad global de la Tierra acusan datos muy diferentes.

Todos los métodos empleados indican que la Tierra pesa cinco veces más que lo que pesaría una esfera del mismo volumen llena de agua.

Resulta, por consiguiente, que si la densidad de las rocas que componen la corteza es de 2,5, poco más o menos, para que el promedio alcance aquella cifra es forzoso admitir que los materiales del interior tienen que ser mucho más pesados que los de la superficie. Un cálculo sencillo permite ver que a la endosfera hay que asignarle el valor 8 por lo menos.

Los resultados obtenidos se han interpretado de modo diverso. Para unos, el aumento de densidad se debe a que los materiales del interior están sometidos a enormes presiones, lo cual determinaría la aproximación de las moléculas y, por consiguiente, el aumento constante y gradual de la densidad, desde la periferia al centro. Para otros, en cambio, el aumento de densidad no se debe a la presión, sino a que los materiales que entran en la composición del interior son más pesados que los de su superficie. Para éstos, por tanto, el crecimiento de densidad puede producirse a saltos. Dos argumentos de fuerza, además de las observaciones experimentales sobre compresibilidad de la materia, coinciden en dar la razón a los que así opinan. 1.º Los meteoritos, el análisis espectral de los vapores de la atmósfera solar y la composición de las rocas volcánicas, acusan una gran riqueza en hierro y níquel, siendo precisamente la densidad de estos elementos la que teóricamente debe corresponder al núcleo. 2.º Si el aumento de peso con la profundidad se debe a la aparición de substancias más densas, el aumento no será continuo, sino que a ciertas profundidades habrá cambios bruscos coincidiendo

con los cambios en la naturaleza química de los materiales nucleares; supuesto que corresponde por entero a la realidad, pues la propagación de las ondas sísmicas por el interior de la Tierra enseña que no lo hacen con velocidad constante, sino que sufren cambios bruscos que se deben a la diferente elasticidad de los materiales de la endosfera. Los aparatos que registran los terremotos permiten calcular la velocidad de las ondas sísmicas a distintas profundidades, y estos elementos de juicio han sido precisamente los utilizados por el geofísico para determinar la elasticidad y deducir la composición de las distintas zonas del interior de la Tierra. Así se ha ido precisando con exactitud casi matemática la extensión, la composición química y las propiedades físicas de cada zona del interior de nuestro planeta.

En líneas generales, la Tierra puede ser comparada a una masa metálica envuelta por una capa escoriácea, de forma parecida a lo que ocurre cuando se enfría la pasta fundida de los altos hornos. El núcleo se halla formado por hierro y níquel, como si se tratara de un meteorito gigantesco; de aquí que la endosfera sea designada con la denominación de *Nife*, dada por Suess. Hacia la superficie, la proporción de metales disminuye gradualmente mientras aumenta la proporción de silicatos de aluminio (*Sial*) que forman casi íntegramente la corteza; son los equivalentes de la sílice, la cal y las cenizas que forman la costra escoriácea de los altos hornos. La capa de transición debajo del sial es rica en silicatos de magnesio (*Sima*). Las distintas zonas que de fuera adentro se distinguen en la Tierra son las siguientes (figs. 2 y 3):

1.º *Corteza terrestre* (60 km. de espesor). Los primeros 20 kilómetros formados por rocas ácidas, es decir, ricas en sílice, graníticas o dioríticas en buena parte, asequibles directamente a la observación. Los 40 kilómetros restantes están constituidos por rocas básicas de composición análoga a los basaltos y gabros, tal como nos revelan los volcanes.

2.º *Capa peridotítica* (1.500-1.600 km.), compuesta por silicatos ferromagnésicos (olivino y piroxenos: enstatita-hiperstena), y algo de feldespatos, formando una roca de composición análoga a la peridotita.

3.º *Capa ferrosférica* (700 km.), formada por sili-



catos con algunos núcleos esporádicos de hierro y níquel en proporción de un 25 por 100.

4.º *Capa litospórica* (700 km.). En ella aumenta la proporción de hierro y níquel, que alcanza un 50 por 100, metales mezclados con algunos silicatos, especialmente olivino.

5.º *Núcleo* (3.400 km.) compuesto íntegramente por hierro y níquel.

Según otros autores, varía el número o la extensión de las zonas que pueden distinguirse; pero, en síntesis, teniendo en cuenta tanto la naturaleza química de sus componentes como las propiedades físicas, elasticidad, densidad, etcétera, que se deducen de la forma de propagarse los sismos, resultan, como admite Sieberg, las siguientes capas: La litosfera silícica (que para este autor tiene 120 km.); un manto exterior, de densidad 3,4, constituido por silicatos; un manto interior o capa intermedia entre 1.200 y 2.600 kilómetros, de densidad 6, formado por silicatos y minerales de hierro, y el núcleo (2.600 km.), de densidad 9,1, constituido por hierro y níquel.

Esta distribución en zonas, que por su precisión y detalle bien pudiera parecer una fantasía, viene comprobada por el análisis y clasificación de los meteoritos, los cuales reproducen exactamente esta distribución en zonas de densidad progresiva hacia el interior, y permiten la comprobación respecto a la naturaleza química. La división de los meteoritos, paralela a la división de la Tierra en 5 zonas, es la siguiente: 1.º litos de origen cortical; 2.º, meteoritos acondríticos,

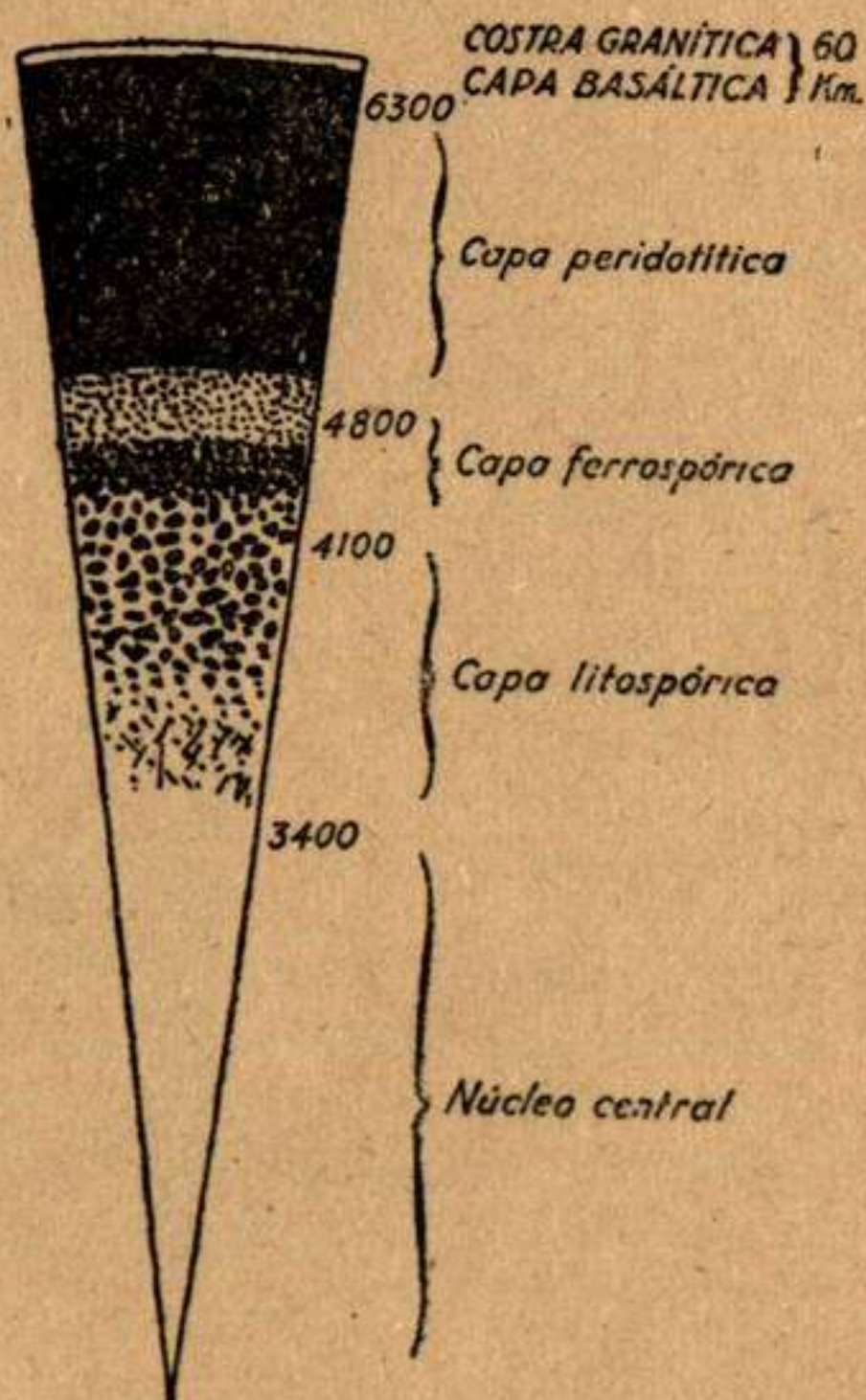


Fig. 2.—Estructura de la Tierra en capas concéntricas (Washington).

pobres en hierro; 3.º, meteoritos condriticos, con nódulos de hierro; 4.º, meteoritos palasíticos, cada vez con mayor proporción de hierro y níquel, y 5.º, meteoritos sideríticos.

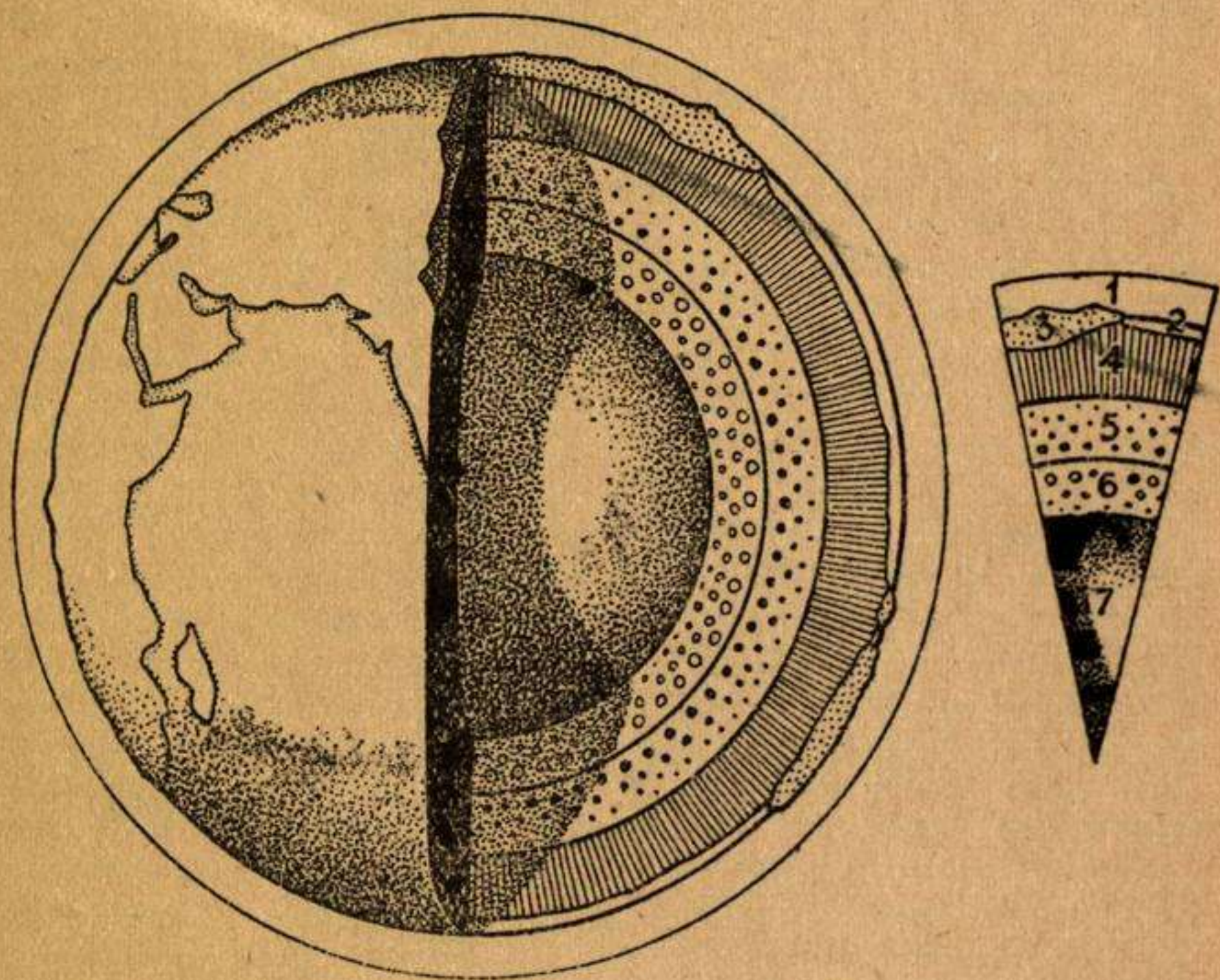


Fig. 3.—Estructura de la Tierra: 1, Atmósfera; 2, Hidrosfera; 3, Bloques de sial; 4, Capa peridotítica; 5, Capa ferrosférica; 6, Capa litospérica; 7, Núcleo central.

### Estado del interior de la Tierra

Es un problema de interés capital para el geólogo, una vez conocida la composición química de los materiales de la endosfera, el estado físico en que se encuentran, pues eso constituirá la base en que tendrá que apoyar sus teorías sobre los fenómenos dinámicos que se manifiestan en la corteza terrestre. Veamos, pues, cuáles son las circunstancias que permiten juzgar acerca del estado del interior de la Tierra.

*Temperatura.* — Es un hecho comprobado que la temperatura aumenta considerablemente a medida que se profundiza en la corteza, de tal forma que, por ejemplo, en las minas de Tomstock (Nevada), uno de los veneros conocidos más ricos en oro y plata, fué preciso abandonar la explotación, ya que, al llegar a los 1.000 metros, la temperatura aumentaba de una manera alarmante. Por término medio, el *gradiente geotérmico*, es decir, la profundidad necesaria para que la temperatura aumente un grado, se evalúa en unos 30-33 metros. Por otra parte, las lavas vomitadas por los volcanes constituyen otra prueba del calor interno, pues acusan temperaturas que oscilan entre 1.000 y 1.500 grados.

En esa medida, y de continuar el fenómeno geotérmico de un modo constante e invariable, a unos 40 kilómetros de profundidad se encontrarían temperaturas del orden de los altos hornos, es decir, de unos 1.200 grados, y de unos 190.000 grados, en números redondos, en el centro de la Tierra, cifra verdaderamente fabulosa imposible de ser admitida sin discusión, a pesar de que esos valores se aceptaban sin la menor repugnancia hace algunos años, en que los miles de grados se prodigaban sin reparo; era cuando la teoría del fuego central gozaba de pleno prestigio, admitiendo como dogma científico que el interior de la Tierra era un flúido incandescente sobre el que reposaba la delicada película sólida de la corteza. Entonces la temperatura del Sol se evaluaba en millones de grados; pero los experimentos modernos de la Física acerca de la irradiación han rebajado en mucho esos cálculos, admitiendo para las capas superficiales del Sol un valor que no excede de 6.500 grados. Esto obliga a ser más prudentes al tasar las temperaturas del interior de la Tierra y a rechazar los valores que resultan de admitir un valor constante para el gradiente geotérmico, pues desconocemos los verdaderos términos en que se plantea esa ley, ya que las regiones exploradas se reducen a una parte insignificante del radio terrestre. Además, infinidad de razones obligan a desechar la teoría de la fluidez del núcleo.

Cabe enumerar entre las más importantes, el no ser posible concebir cómo una débil costra de 50 kilómetros de espesor podría soportar la tensión del potente

flúido interno de una esfera de 6.000 kilómetros de radio. Por lo menos la corteza sufriría deformaciones parecidas a las mareas y el aplastamiento polar sería mucho más considerable. Además, ciertas clases de ondas que se producen durante los terremotos, no podrían propagarse en un medio líquido. Por todas estas razones, la teoría del núcleo flúido e incandescente ha sido rechazada y substituída por la llamada de la *rigidez del núcleo*, en la que se admite que el interior de la Tierra tiene la rigidez del acero, resultado muy en consonancia con los datos ofrecidos por la Geoquímica.

La hipótesis acerca del origen del fenómeno geotérmico permite explicar perfectamente que la temperatura sea constante o aumente muy poco a partir de cierta profundidad. En efecto, se tienen argumentos suficientes para atribuir a la disgregación de los minerales radioactivos la causa del calor interno. No hay, pues, ninguna necesidad de recurrir a la hipótesis del fuego central para encontrar una explicación al aumento de calor con la profundidad. Basta recordar que el radio y otras substancias radioactivas sufren un proceso continuo de desintegración que proporciona cantidades enormes de calor. En las rocas ácidas, que son las que más abundan en la superficie, la proporción media de materias radioactivas que contienen es suficiente para producir el calor requerido por el grado geotérmico. En cambio, las rocas básicas del interior y los meteoritos sideríticos de profundidad, carecen de ellas. Según eso, teniendo en cuenta las condiciones de presión y rigidez del núcleo, la temperatura del interior debe de oscilar alrededor de 3.000 a 4.000 grados.

*Presión y estado físico.* — De no haber nada que se opusiera a la fusión, los materiales pasarían al estado líquido; pero no se puede perder de vista que las condiciones en que se encuentran en el interior son muy distintas de las que conocemos en los laboratorios. Así, Tamman, que ha estudiado lo que sucede al someter algunas substancias a ciertas temperaturas superiores a las de fusión y a presiones que llegan casi a 10.000 atmósferas, llega a la conclusión de que todos los cuerpos pueden tomar el estado sólido sometiénolos a una presión suficientemente elevada y que permita estrechar

los espacios intermoleculares; ¡y no debe olvidarse que en el interior de la Tierra existen muy verosímilmente presiones de 3 millones de atmósferas! Esto quiere decir que no es posible establecer ningún paralelismo ni concebir las condiciones en que en estas circunstancias se encuentra la materia, completamente distintas de las que podemos reproducir experimentalmente; se trata de un estado especial de agregación llamado *século-fluidal*, en el que una misma substancia puede comportarse como sólida o líquida según sea la manera de actuar de las fuerzas que obran sobre la misma. Así, por ejemplo, el hielo, que es sólido y quebradizo, se dobla fácilmente y resulta ser plástico si a una barra sostenida por los extremos se le aplica un peso en el centro. Otro caso de plasticidad por presión es el de la acuñación de monedas. Así, el interior de la Tierra es plástico para fuerzas de proceso lentísimo, como el apuntado anteriormente de desplazamiento continental en sentido contrario al de rotación de la Tierra, mientras se comporta como perfectamente rígido y sólido para movimientos bruscos, como los terremotos. La temperatura es suficiente para producir la fusión, pero las moléculas se encuentran tan juntas como en el estado sólido a causa de la enorme presión que experimentan; sería, por tanto, suficiente disminuir ésta para que el magma plástico pasara al estado líquido.

## CAPITULO II

### MATERIALES DE LA CORTEZA

#### SEDIMENTACIÓN

##### Estructura

Los datos aportados por la Geofísica acerca de la naturaleza y del estado del interior de la Tierra, sólo han servido hasta ahora para aclarar la mecánica y el origen de las energías geológicas, particularmente de las que, partiendo de la endosfera terrestre, se manifiestan en la superficie del planeta. Son, indudablemente, los elementos de juicio indispensables en que se basan las teorías que pretenden explicar cómo se han formado las cordilleras de montañas o cómo se desarrollan las fuerzas volcánicas y sísmicas. El porvenir, sin duda, les reserva un papel más preponderante. Quizá en un futuro no demasiado lejano, los instrumentos de precisión del geofísico substituirán con ventaja al martillo del geólogo, o, por lo menos, serán sus compañeros indispensables en la prospección subterránea. Pero, en la actualidad, las investigaciones propias de nuestra ciencia toman otros derroteros.

Las observaciones geológicas más importantes reposan sobre la naturaleza y ordenación de los materiales que forman los continentes, los cuales son visibles en trincheras, túneles, pozos de mina, y, en general, allí donde una vegetación muy tupida no impide la observación directa de la superficie del terreno.

Así se ha visto que atendiendo a su origen y disposición cabe distinguir tres clases de elementos estructurales. Unos se disponen formando capas paralelas como las hojas de un libro; entre estas capas o *estratos* se suele encontrar restos de seres, ordinariamente marinos, que vivieron en otras épocas geológicas; como, además, las partículas que forman los estratos, cantos

rodados, arenas, etc., son detritos de otras rocas transportados, generalmente, por los ríos hasta el mar en donde se depositaron, esta clase de rocas reciben el nombre de *sedimentarias*, y *sedimentación* el fenómeno que los determina (fig. 4). En virtud de la forma de depositarse, los más modernos reposan sobre los más antiguos. Los sedimentos son los materiales con los cuales se construirán las futuras montañas, y los que mejor señalan, a través de sus particularidades, las circunstancias del país donde se depositaron. El color de los sedimentos, el tamaño de los detritos, su composición química y los restos orgánicos que contienen,



Fig. 4.—Clases de rocas de la corteza terrestre.

constituyen indicios de gran valor para la reconstitución histórica del pasado de la Tierra. Por eso el fenómeno de la sedimentación será estudiado con mayor detalle en este capítulo.

Atravesando las capas sedimentarias se ven otras rocas que forman masas homogéneas, sin señales de estratificación alguna; además, se las encuentra en la base de todas las formaciones sedimentarias y en su contacto los estratos se hallan transformados profundamente, como si hubiesen sido sometidos a elevadas temperaturas y enormes presiones. Como, por otra parte, los elementos que forman estas masas son cristales perfectos, sin la menor señal de haber rodado, y que sólo pudieron cristalizar en el seno de una masa fundida, a estas formaciones se las conoce con el nombre de *eruptivas*; y, en efecto, frecuentemente se las ve formar las raíces de los volcanes, o fluir fundidas al exterior. Otras veces forman vetas o *filones* que se infiltran por las fisuras de las rocas. En uno y otro caso, esta clase de expansiones consolidadas de las rocas ígneas se fusionan en profundidad con los grandes macizos eruptivos

o *batolitos*, en que se apoyan todas las formaciones sedimentarias conocidas (fig. 4). El *granito* es la roca que más abunda en los batolitos eruptivos, mientras los *pórfidos* son los representantes típicos de las rocas filonianas. Otros pormenores acerca de las rocas eruptivas y de su formación se darán a conocer al estudiar los volcanes.

Por último, las rocas que por haber estado en contacto con estas masas ígneas han sufrido una cocción a causa de las elevadas temperaturas y grandes presiones y se han transformado recristalizando, se las llama *rocas metamórficas*; en ellas abundan los cristallitos de mica, granate, etc., minerales que se han formado durante el proceso del metamorfismo. La presión sufrida comunica a este género de rocas una pizarrosidad muy característica, designándose por este motivo con el nombre de *pizarras metamórficas*.

## Sedimentación

Los derrubios continentales arrastrados por las aguas corrientes, el viento y el hielo, en virtud de la gravedad, son transportados hacia las partes más bajas del relieve, donde se acumulan y depositan de un modo provisional o definitivo, ora en los continentes, ora en las costas, ora en los fondos oceánicos.

### *Sedimentación continental*

Las acumulaciones que tienen lugar en los continentes guardan ciertas analogías entre sí, pero también ofrecen ostensibles diferencias según sean los detritos y el agente de arrastre, distinguiéndose unos de otros por la forma de sus yacimientos y la manera de estar distribuidos los elementos errátiles.

Las aguas torrenciales, en su marcha violenta y desenfrenada, arrastran derrubios de todas clases y tamaños que son abandonados en masas de informe mezcolanza así que entran en terreno llano; las corrientes fluviales llevan de ordinario residuos de poco peso; pero en las avenidas transportan cantos rodados, arenas y tierras, de calibre vario, que son depositadas en capas uniformes y alternantes en sus riberas y en su desembocadura; las aguas estancadas, en su quietud,



precipitan en fondos lacustres o en lechos cenagosos los materiales en suspensión y los minerales que llevan disueltos, para rellenar los huecos, revestir las paredes y cubrir el suelo con partículas diminutas que constituyen capas uniformes y fácilmente deleznable; el aire, en sus correrías eólicas, traslada a distancia varia los granos de arena para amontonarlos en la playa o en el desierto y aun los más finísimos de polvo para fijarlos como tierra laborable de escasa consistencia; las erosiones volcánicas extienden sus lavas y cenizas en superficies regulares y continuas por la zona que circunda el aparato emisor.

Estos depósitos continentales pueden tener una duración indefinida y hasta pueden llegar a constituir una nueva formación geológica, pero en general gozan de una vida precaria, por cuanto sus elementos litológicos serán arrastrados por la acción pertinaz de las corrientes fluviales hasta el fondo oceánico, en donde quedarán sentados de un modo definitivo.

Las áreas continentales, si bien ofrecen condiciones biológicas excelentes para una vida intensa y variada en correspondencia con los cambios climáticos, son en cambio muy pobres por lo que se refiere a restos fósiles. La superficie de la Tierra es poco a propósito para la conservación de los cadáveres; los de los vegetales se descomponen por completo y se convierten en humus o mantillo, y los de los animales descompuestos a la luz del Sol o devorados por otros que se alimentan de la carne muerta, quedan enteramente destruidos; aun las partes esqueléticas más duras resisten difícilmente tantos agentes destructores. En cambio abundan las impresiones dejadas por el oleaje (*ripple-marks*), la lluvia, pistas de animales, etc.

### *Sedimentación oceánica*

Las acumulaciones de derrubios en el fondo marino alcanzan magnitudes fabulosas; la superficie de los depósitos se calcula en bastantes millones de kilómetros cuadrados, y en algunos millares de metros su espesor. Para formarse una idea de la magnitud del fenómeno, basta tener en cuenta que los ríos arrastran anualmente diez millones y medio de kilómetros cúbicos de sedimentos al mar, siendo suficientes 7 millones

de años, período insignificante para la Geología, para arrasar la Tierra; entonces el nivel de los mares habría ascendido 400 m.

Si el reparto de los materiales se verificase de una manera uniforme y las posibilidades vitales fueran análogas en las distintas latitudes oceánicas, los nuevos sedimentos poseerían una misma estructura en todas sus partes, y, por lo tanto, el estudio de un pequeño sector cualquiera facilitaría el conocimiento del conjunto.

Pero la calidad de los elementos litológicos varía según el lugar de emplazamiento del depósito; por razón de la gravedad, los detritos más groseros o más densos se precipitan antes y ocupan las regiones cercanas al litoral, particularmente en las proximidades de la desembocadura de los ríos, y van siendo cada vez más finos y ligeros conforme se apartan de la costa. Por otra parte, los organismos viven estrechamente adaptados a determinadas condiciones de temperatura, luz y salinidad de las aguas, de las cuales pueden apartarse muy poco; y como estas circunstancias difieren con la profundidad, una fauna y una flora aparecerán como propias e inherentes a cada una de las distintas zonas del contenido acuático.

Así, pues, a una determinada clase de materiales corresponde a su vez un determinado conjunto de restos biológicos, y viceversa. De aquí nace el concepto de *facies*, o sea el aspecto o conjunto de caracteres de una formación sedimentaria. Por lo tanto, el estudio de las condiciones físicas, químicas y biológicas de la sedimentación actual, constituye un elemento de juicio seguro para precisar las circunstancias en que se depositaron los materiales que forman la corteza.

Teniendo en cuenta todos estos caracteres, el ambiente marino puede ser dividido en tres zonas: *nerítica*, *batial* y *abisal*, a cada una de las cuales corresponde una facies peculiar y adecuada a sus modalidades.

*Zona nerítica.*—La parte de tierra firme que desde el borde inferior del dominio litoral se desliza suavemente debajo del agua oceánica hasta una profundidad máxima de 200 metros, se denomina *plataforma continental*, y desde el punto de vista de la sedimentación recibe el nombre de *zona nerítica*. Su amplitud, por

tanto, dependerá de la mayor o menor inclinación del continente.

En esta zona, la temperatura es sumamente diversa, en correspondencia con las diferencias de latitud y de la variación de los factores climáticos; no obstante esas diferencias térmicas, posee, en general, unas excelentes condiciones biológicas, si bien algún tanto restringidas en las regiones frías y en cambio muy holgadas en aquellas que gozan de un ambiente suave o cálido. Además, como la luz penetra hasta los cuatrocientos metros de profundidad, la zona nerítica queda iluminada en toda su extensión, cuya circunstancia aumenta en sumo grado las posibilidades vitales, por lo que aparecerán en ella una vegetación abundante y un mundo orgánico extremadamente rico en especies de todo orden.

La flora está nutrida, principalmente, por algas de color verde, pardo o amarillo, que flotan en la superficie, y por las de color rojo que se fijan en el suelo acuático. Esta coyuntura permite una fauna varia en especies herbívoras, carnívoras y limnivoras, en la que, además de los peces, se cuentan algunos mamíferos y un gran contingente de las diversas variedades que constituyen el grupo de los invertebrados.

En la biología nerítica se comprende un buen número de seres que carecen de traslado voluntario, los cuales son arrastrados por las corrientes marinas y en cantidades astronómicas se hallan flotando en el agua. Forman el llamado *plancton*, integrado por diatomeas, una infinidad de formas animales diminutas como medusas, crustáceos microscópicos, radiolarios y foraminíferos, y, además, huevos y larvas de distinta clase.

En cambio, existe multitud de especies vivas que desenvuelven su existencia en el fondo marino y colectivamente son denominadas *bentos*. Abarca una buena porción de algas; algunos animales fijos como esponjas, pólipos, gusanos tubícolas y ostras, y otros que se mueven libremente, como equinodermos, moluscos gasterópodos, ciertos crustáceos, gusanos errantes y algunos peces serpentiformes o aplanados (raya, lenguado, etc.).

El continuo movimiento a que se hallan sometidas las aguas de esta zona, obliga a la adaptación de los seres

vivos mediante órganos protectores capaces de resistir los más recios embates del oleaje; esta protección se verifica por un dermatoesqueleto muy desarrollado y compuesto de conchas, valvas o caparazones de naturaleza caliza, que en algunos casos adquiere magnitud desproporcionada con el volumen reducido del animal.

Los elementos litológicos que entran en la constitución del sedimento pueden tener distinta procedencia. La capa más profunda corresponde a los materiales groseros del dominio continental, que forman lo que se llama conglomerado de base. Otro sector pertenece a los derrubios facilitados en cantidades fabulosas por las corrientes fluviales y por la fuerza erosiva del oleaje; y, finalmente, un tercer contingente está integrado por restos de los cadáveres de los seres vivos que pueblan esta zona.

Así, pues, en resumen, la formación nerítica ofrece el aspecto de conglomerados varios cuyos elementos menguan en calibre conforme se aproximan a las capas más alejadas de la costa, pasando de los conglomerados ribereños a areniscas cada vez más finas con manifestaciones fosilíferas en correspondencia con las variedades biológicas del respectivo ambiente marino.

*Zona batial.*—Al terminar la plataforma continental se inicia el talud de rápida pendiente, bastante cercana a la verticalidad, el cual se escurre hasta las grandes profundidades oceánicas. La región comprendida entre los doscientos y los mil metros se denomina *batial*.

Esta zona es de temperatura uniforme y no presenta otras oscilaciones térmicas que las impuestas por las corrientes marinas; desde los cuatrocientos metros está falta de luz en absoluto, y sus aguas gozan de tranquilidad completa, que tan sólo se altera en casos excepcionales de fuerte tempestad.

Por tanto, las posibilidades vitales son en menor número que en la anterior. Del bentos desaparece todo vestigio de vegetación y en consecuencia la fauna del suelo marino se halla exenta de animales herbívoros y queda reducida a las especies carnívoras y limnivoras de la plataforma continental. En cuanto a los restos de los cadáveres planctónicos de la superficie de las aguas, se precipitan en gran parte en el fondo batial integrando sendas capas de esta formación geológica. En

el resto de la fauna figuran casi los mismos organismos que en la nerítica.

La zona batial recibe la mayor parte de los materiales litológicos; éstos son menos variados que en la nerítica a causa de una mayor homogeneidad de procedencia; pero a su vez lo son más que en la abisal, que en este respecto no se halla influenciada por las aportaciones terrestres. En los sedimentos predominan los barros terrígenos, arcillas y margas, arenas finas y corpúsculos de naturaleza caliza. Una buena parte de estos elementos es de origen mineral, barros y arenas verdes, rojas, azules y volcánicas, todos los cuales están en suspensión en las aguas neríticas, siendo transportados por las corrientes marinas. Una segunda serie corresponde a los barros y arenas de procedencia orgánica, ya de los arrecifes coralinos, ya de los restos de pterópodos, globigerinas, radiolarios y diatomeas, que en lluvia continua se precipitan en el fondo oceánico.

En resumen, la facies batial se caracteriza por sedimentos homogéneos calcáreos o detríticos de grano fino, que a veces llegan a alcanzar espesores enormes, formados por capas uniformes desprovistas de intercalaciones sedimentarias continentales, y con concreciones fosilíferas exentas de restos vegetales y de formas de animales herbívoros.

*Zona abisal.*—La región submarina que desde el veril de los mil metros alcanza hasta las mayores fosas oceánicas, se denomina región *abisal*.

La temperatura de esta zona es uniforme y rayana a cero grados; sus aguas gozan de una tranquilidad constante y absoluta, y carece de luz en toda su extensión.

En este medio, la vida es más precaria que en las zonas precedentes; está exenta de flora como en la batial, y la fauna que se desarrolla en los fondos abisales se compone de animales que se devoran los unos a los otros o que se alimentan de los restos orgánicos contenidos en el cieno. Unos son completamente ciegos y en éstos la falta del sentido visual se compensa con el desenvolvimiento extraordinario de los órganos táctil y olfativo y por largos tentáculos muy sensibles o por una boca grande a propósito para cazar a tientas (cangrejo abisal, gastrostomas, etc.). Otros disponen de ojos enormes con elementos productores de fosforescencia

que les facilita la visión (*Dactylostomias afer*, etc.). Las especies son algún tanto numerosas y se encuentran por igual en todos los fondos abisales.

La construcción litológica en las zonas abisales es muy lenta, y en los sedimentos predomina el barro o cieno de origen planctónico, semejante, en composición, al de la zona batial, y una arcilla roja de procedencia volcánica y orgánica al mismo tiempo.

Así, pues, la facies de esta zona presentará sedimentos de gran espesor, de estructura fina y homogénea, y con la carencia de restos fósiles de vegetales y vertebrados, en cuanto los esqueletos de mamíferos y peces, en su lenta caída, se disocian antes de llegar al fondo abisal. Únicamente resisten las piezas más consistentes y duras, como los dientes de los peces y el hueso timpánico de las ballenas.

El conocimiento de las facies marinas de por sí y en relación con la repartición de la vida en el actual dominio oceánico, permite determinar y rehacer en nuestra imaginación el clima, el paisaje, y, en general, toda la vida tal como se produjo en el momento y en el sector del planeta en que tuvo lugar la formación geológica determinada. Así ha podido precisarse la extensión que tuvieron los antiguos mares y la profundidad de los mismos, y las condiciones del medio en que se desarrolló la vida de antaño; se ha venido en conocimiento de que los organismos y sedimentos que convienen a las latitudes ecuatoriales han variado de posición en el transcurso de los tiempos; que, por análogas razones, el Polo Norte estaría más próximo de Europa que en la actualidad. El conocimiento y repartición de las facies es, pues, la clave de la Geología Histórica.

Un sedimento de piedra litográfica, por ejemplo, situado en las regiones cimales de una recia cordillera, nos dice que se trata del fondo de un antiguo océano, ya desaparecido, de aguas tranquilas y quietas, de profundidad superior a doscientos metros, de temperatura constante, de luz escasa, con el suelo exento de vegetación, con fauna abundantísima, y con ambiente marino repleto de plancton cuyos restos calcáreos y de finísimo espesor se van depositando en tupida lluvia en capas regulares y uniformes. Los gruesos conglomerados y areniscas de color rojizo que tanto abundan en Europa al principio de la Era Secundaria, nos revelan la pre-

térta existencia de un clima excesivamente cálido, causa eficiente de las alteraciones químicas ferruginosas que dan el consabido color, y nos sugiere la remota concurrencia de una potente vía fluvial que transportaba con impulsos torrenciales los derrubios depositados en parajes próximos a las desembocaduras, en el caso de los conglomerados, y de un relieve envejecido y de escasa pendiente, en el caso de las areniscas finas. Un sedimento hullífero nos atestigua la pasada emergencia de unas tierras tapizadas con el verde obscuro de frondosos bosques nutridos por helechos gigantes, con un clima húmedo de lluvias frecuentes, de cielo cuajado de nubes, y un calor moderado a propósito para un extenso manto vegetal de vida exuberante y para una rápida y completa carbonización del maderamen selvático.

### Transgresiones y regresiones marinas

Frecuentemente, los límites del dominio continental son objeto de prolongados desplazamientos. La facies de los sedimentos depositados sobre los bloques continentales, demuestra que el mar ha invadido muchas veces regiones enteras que anteriormente eran tierras emergidas, y viceversa. Dichos movimientos de avance y retroceso de las aguas reciben, respectivamente, el nombre de *transgresiones* y *regresiones marinas* y pueden considerarse como mareas de gran envergadura y de duración ilimitada.

En las transgresiones, los sedimentos litorales, conglomerados y areniscas, constituyen el soporte de la nueva formación litológica, encima de los cuales, y a medida que avanza el mar, se van precipitando otras capas sedimentarias de detritos cada vez más finos, calizas organógenas y, finalmente, si tan profunda ha sido la transgresión, las finas margas y arcillas de los grandes fondos. En las regresiones, conforme el agua retrocede, los derrubios, en los depósitos sucesivos, varían en sentido inverso, siendo cada vez de mayor calibre (fig. 5).

Así, por ejemplo, en los albores de la Era Secundaria, suelen encontrarse en la mayor parte de Europa los ya anteriormente citados conglomerados rojizos de grueso calibre; siguen encima areniscas igualmente purpú-

reas, que denotan todavía un régimen continental; inmediatamente encima de éstas se presentan calizas conchíferas marinas que indican que casi toda Europa se sumergió en los mares de aquella época (*transgresión*); pero, seguidamente, aparecen arcillas rojizas, mezcladas

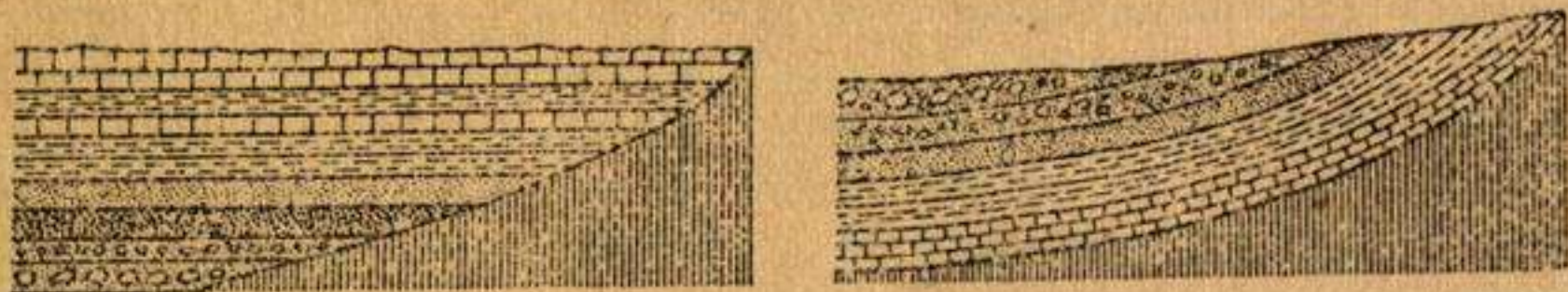


Fig. 5.—Serie transgresiva y serie regresiva.

con yesos, que denotan un régimen lacunar, casi continental, muy cálido; es decir, Europa emerge nuevamente (*regresión*); esta estructura zonar en tres horizontes es la que ha dado nombre al período del comienzo de la era, que por esta razón se denomina *Triásico*. Algo parecido se observa en toda la región mediterránea al comenzar la Era Terciaria.



## CAPITULO III

### GEOLOGÍA DINÁMICA

#### LA VIDA DE LA TIERRA

##### La Tierra como ente vital

Si observamos cotidianamente una determinada planta, de un día para otro la veremos siempre igual, sin un cambio sensible en cuanto a su crecimiento y desarrollo, pues la diferencia que puede surgir en el curso de veinticuatro horas es tan tenue y sutil que apenas puede ser percibida por nuestra vista; pero si del vegetal impresionamos unos metros de película cada semana, esto es, siguiendo un ritmo regular de tiempo con intervalos suficientemente espaciados para poder contrastar una variación tangible entre dos consecutivos, y si luego proyectamos la cinta cinematográfica, podremos contemplar en la vertiginosa sucesión de las imágenes una concreción sintética de los cambios que se habrán operado en la referida planta, con tal viveza y plasticidad que ésta aparece como un ser dotado de músculos y nervios en que cada órgano se mueve y actúa con animación inusitada.

Análogamente, si nos detenemos en el examen de un lugar cualquiera del planeta, en relación con el aspecto que pudo ofrecer en su relieve de lustros anteriores, seguramente no podríamos registrar variación alguna que mereciere la pena de citarse; pero si una vez cada cien años, por ejemplo, se lograra impresionar sendas cintas cinematográficas concernientes a los distintos sectores del Globo terráqueo, para reunir las y seriarlas al cabo de muchos siglos, podría plasmarse en la pantalla, como en el caso de las plantas, la evolución operada en las costas, en las montañas, en los ríos y hasta en los propios continentes, y cuantos cambios terrestres, que, por la lentitud con que se producen,

no es posible percibir en un lapso de tiempo tan relativamente corto como es el que corresponde a la vida del hombre. En aquellas condiciones, se vería salir las montañas del seno de las aguas, elevarse hasta formar cordilleras enhiestas, para desaparecer en seguida corroidas y como disueltas por las aguas, el hielo y el viento; veríamos avanzar los continentes mar adentro, mientras, por otro lado, las costas retrocederían rápidamente atacadas por el oleaje; se hundirían continentes enteros para surgir otros en lugares distintos; en síntesis, la superficie terrestre aparecería dotada de una actividad vital tan asombrosa que en nada se diferenciaría del movimiento propio de los seres animados.

El aspecto de la Tierra, pues, no ha sido siempre el mismo; hoy no es como fué ayer, y mañana no será como es hoy. Sus formas actuales no son más que el resultado de los diversos cambios habidos desde el principio del planeta hasta nuestros días. Por observaciones debidamente contrastadas, venimos en conocimiento de montañas, como los Pirineos y los Alpes entre otras, que a tres y cuatro mil metros de altitud, respectivamente, nos ofrecen restos fósiles de animales que tuvieron su vida en el océano, restos que patentizan cómo los citados salientes constituyeron el fondo de mares totalmente desaparecidos; y de la misma suerte se tiene noticia de elevaciones terrestres que se irguieron recias en épocas muy remotas, que después han quedado sumergidas en las aguas oceánicas, así como se citan cordilleras que un día se levantaron potentes y atrevidas sobre las llanuras de Brabante o de la planicie rusa de las que apenas se notan vestigios de su anterior existencia.

Los mismos continentes, cuya consistencia parece asegurarles una estabilidad eterna, no se hallan exentos de análogos trastornos; se aducen pruebas suficientes para convenir en la presencia de un antiguo *Continente Catalanobalear* sumergido hoy en gran parte en el Mediterráneo, como la misma *Tirrenida* italiana, o la *Lemúrida* que se extendería por el Indico. Y la leyenda nos habla del conocido por la *Atlántida*, existencia que los literatos admiten como cierta, y del que en cambio discuten aún los geólogos la posibilidad de su pasada emergencia. En sentido opuesto, es oportuno citar el

caso actual de Escandinavia, cuya península participa de un lento movimiento de emersión evaluado en un centímetro por año y debido al cual van aflorando a la superficie tierras que hasta hace poco estaban cubiertas por el mar.

De todo lo expuesto podemos inducir, como conclusión, que el Globo terráqueo no debe entenderse como un ser inerte que desde un principio adquirió una forma definitiva e inalterable en el transcurso de los siglos; en cambio debemos admitir como verdad inconcusa que la Tierra ha de considerarse como un ser vivo que realiza movimientos, en virtud de su fuerza ingente, al igual que los entes biológicos.

Esos movimientos o cambios no se verifican al azar ni de una manera casual; obedecen al ritmo impuesto por unas leyes permanentes, como permanente es la causa eficiente que las determina.

### Principio fundamental de la Geología

Los agentes promotores de esa continua evolución del Globo pueden ser agrupados en dos grandes sectores: unos que tienden a alterar el estado de equilibrio o de reposo y producen las enormes desigualdades que presenta el aspecto del planeta, levantan las masas a alturas considerables y forman las depresiones y grandes simas marinas; otros, que obran en sentido opuesto, corrigen las sinuosidades del terreno, aplanan los salientes, rellenan los huecos y buscan la nivelación primitiva. Los primeros actúan como fuerzas constructivas, crean el relieve y son vivas manifestaciones de la actividad interna de la Tierra; en ellos se incluyen los volcanes y las fuerzas que crean las cordilleras; los segundos son verdaderas fuerzas destructoras, deshacen los relieves y residen en el ambiente exterior que rodea la costra sólida. Figuran en este grupo la acción desarrollada por el viento, el agua y el hielo y aun los seres vivos. Los primeros constituyen los factores internos de la vitalidad terrestre; los segundos forman el conjunto de elementos externos que desgastan las energías del ser vivo.

La acción de los agentes internos está estrechamente relacionada con la que despliegan los externos, y los respectivos grupos de fenómenos que originan las fuer-

zas creadoras y las destructoras se suceden con orden y ritmo inalterables, formando entre sí un conjunto de hechos perfectamente articulados que se conoce con la denominación de *ciclo de los fenómenos geológicos*.

En cada ciclo se distinguen tres fases o períodos que se hallan dispuestos en la siguiente forma:

a) *Orogénesis*: fase que comprende el período en que actúan los agentes internos hasta producir un relieve o montaña.

b) *Gliptogénesis*: fase que abarca el período en que los agentes externos trabajan para destruir el saliente anterior y transportan los materiales resultantes de la destrucción; esta labor propia de los agentes externos recibe el nombre de *erosión*.

c) *Litogénesis*: fase que pertenece al período de descanso, en que se sedimentan y consolidan los materiales acumulados en las depresiones marinas y hondonadas, para constituir nuevas rocas que a su vez serán levantadas al empezar un nuevo ciclo.

Los ciclos se suceden de un modo incesante, y siempre con los mismos rasgos esenciales. Cuando termina el primero con el depósito y estratificación de los detritos arrastrados hasta el fondo oceánico, empieza el segundo con la erección de nuevo núcleo montañoso emergente de las aguas; a continuación entran en juego las fuerzas opuestas, para retocar primero y destruir después el relieve aparecido, y acaba con una nueva acumulación de materiales en el suelo marino. Y así, indefinidamente, en ciclos sucesivos, conforme al ritmo de las leyes impuestas por la Naturaleza, la superficie de la Tierra se transforma de continuo.

### **Muerte del relieve. La peniplanicie**

En el ser vivo de estructura algún tanto complicada, cada aparato, cada órgano, cada tejido, cada célula, desenvuelve las funciones que le son propias con entera autonomía y realiza los procesos generales de la vida con matices peculiares que en nada alteran la armonía del conjunto ni las naturales relaciones que deben existir entre el todo y las partes. Y aun no puede olvidarse que los organismos se renuevan continuamente; las células epiteliales acaban muriéndose y se desprenden y son substituídas por otras que nacen debajo de

la piel; de forma que en el organismo vivo se destruyen todos los días millares de unidades vitales hasta acabar con la vida del conjunto; por eso puede afirmarse la paradoja de que, desde el nacimiento, el ser vivo es un inmenso cementerio.

De la propia suerte los distintos accidentes topográficos, esto es, cada continente, cada península, cada isla, cada cordillera, cada valle, cada río, cada torrente y hasta cada porción de tierra, por pequeña que sea, gozan de vida propia y realizan las transformaciones que les son adecuadas con características peculiares, y los fenómenos geológicos presentan su faceta particular según la naturaleza del accidente. Y hasta es posible el completo aniquilamiento de un relieve o la necrosis de una de sus partes sin que influya grandemente en los otros elementos ni cese la vida total del planeta.

En la vida de todo accidente geográfico, el proceso erosivo presenta, como en el organismo viviente, tres etapas perfectamente distintas y destacadas que se conocen con los nombres de *juventud*, *madurez* y *senectud*. Examinemos, por ejemplo, lo que ocurre en las montañas (fig. 6).

Apenas ha emergido un núcleo montañoso, un accidente cualquiera del terreno, empieza la *fase inicial* o *de juventud*, caracterizada por la actividad violenta y tumultuosa de las fuerzas destructoras y por los cambios frecuentes de la topografía. Los valles son cada vez más profundos y encajados, se modifican las vertientes, menudean las cascadas y raudales; los derrumbios no pueden evacuarse en su totalidad y quedan atascados al pie de las laderas o en los sitios en que disminuye la pendiente; tampoco escasean los derrumbamientos del terreno; las fuerzas de resistencia son potentes y las de ataque obran con energía e impulsivamente, produciéndose choques bruscos.

La *plenitud* o *edad madura* es la fase de armonía o equilibrio. Los trabajos de erosión están bastante adelantados; las laderas de los valles son de escasa pendiente, el avenamiento se organiza de una manera regular, los productos de destrucción de los salientes son transportados en su mayoría hacia las partes bajas del pie de la montaña, cesan los derrumbamientos de tierras; las fuerzas internas y las externas actúan con moderación y estrechamente combinadas.

La etapa de la plenitud es larga, pero al fin y al cabo transitoria; la erosión termina su labor y aparece la *fase de senectud* equivalente a la *muerte*, en que decae la energía de los agentes externos hasta quedar ador-

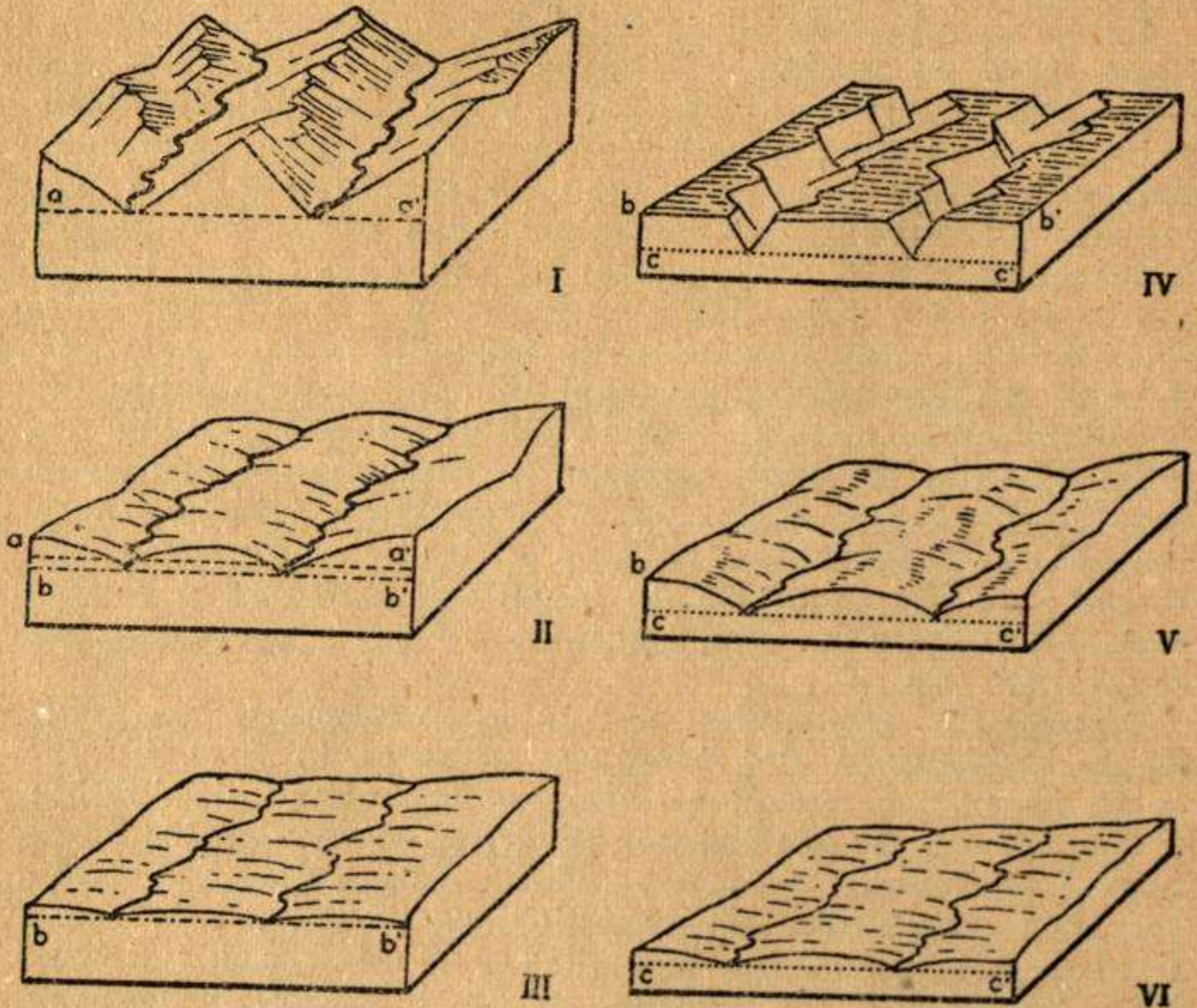


Fig. 6.—Evolución del relieve.

De I a III.—Formación de la peniplanicie a expensas de un relieve joven.

De IV a VI.—Rejuvenecimiento del relieve por levantamiento del país y formación de una nueva peniplanicie.

mecida o aletargada. Ha desaparecido la desnivelación, y el modelado de las vertientes se reduce a tenues ondulaciones; los derrubios son pocos, y resbalan con dificultad y llenan toda la superficie; los valles se ensanchan hasta confundirse unos con otros en una llanura prolongada y uniforme. La montaña ha finali-



Evolución del relieve. I. Formas juveniles: el macizo de La Maladeta, en el Pirineo. II. Formas maduras: el Tibidabo (Barcelona). III. Formas seniles: peniplanicie de las Guillerias (Cataluña). (Fotos. Solé)

FORMACIONES SEDIMENTARIAS



FIG. 1. — Conglomerados de capas horizontales en *Las Castellanas* (Sant Llorens del Munt, Barcelona).

(Foto. Solé)

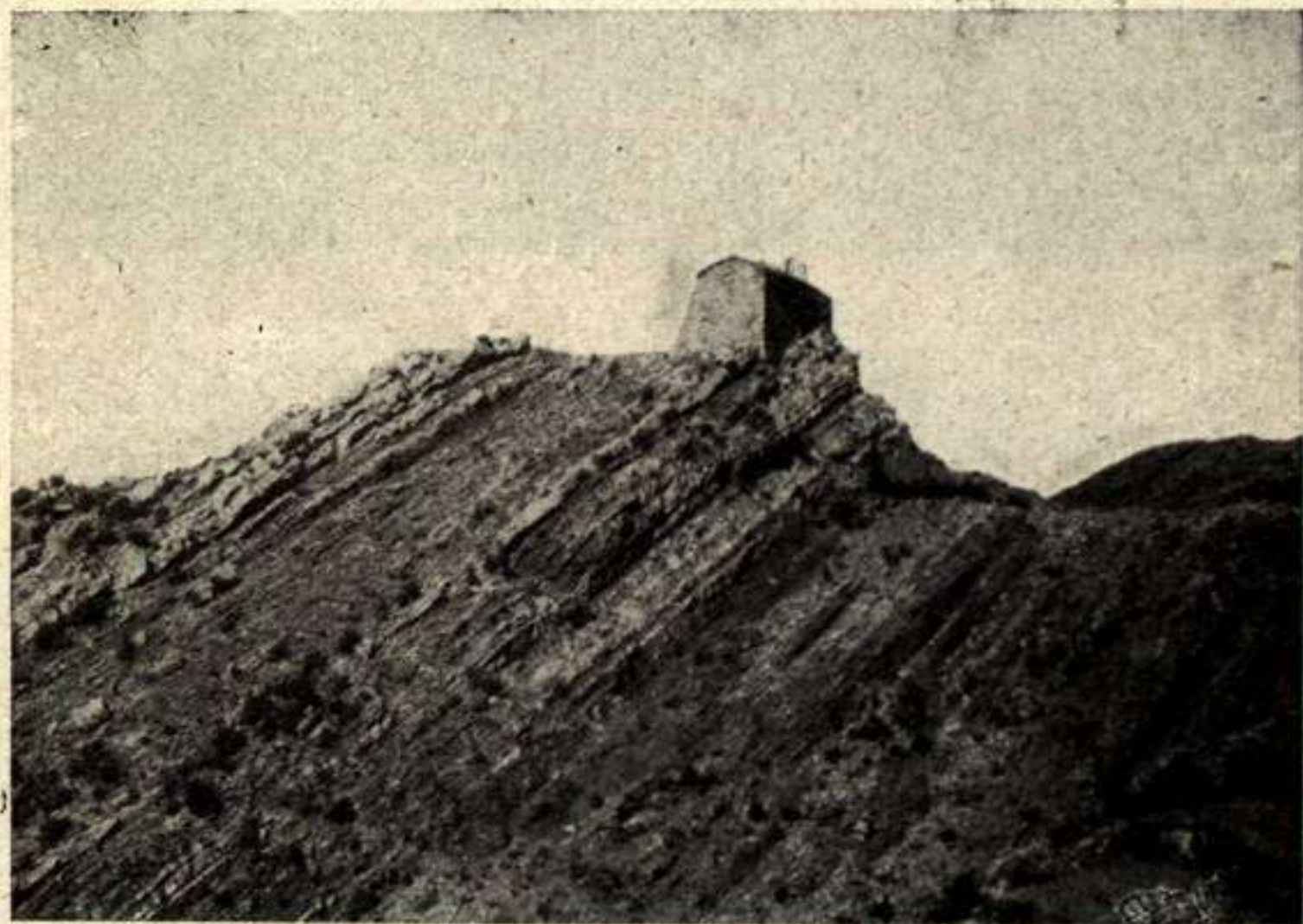


FIG. 2. — Capas triásicas inclinadas en *Castellar de Nuc* (Barcelona).

(Foto. Solé)



zado su existencia y en su lugar aparece la *peniplanicie*, que es el último resultado de la erosión normal y significa la muerte de la montaña. Únicamente un nuevo levantamiento puede rejuvenecer el relieve y crear formas lozanas que a su vez serán atacadas y destruidas por los agentes exteriores encuadrados en un nuevo ciclo.

El conjunto de las tres fases o períodos se conoce por *ciclo de erosión* y viene a ser como la vida de un órgano dentro del conjunto vital de la Tierra. La evolución de las formas se realiza siempre según un ritmo normal que ofrece en cada relieve particularidades específicas.

La inestabilidad de las formas de la Tierra, el orden que preside la sucesiva eclosión de los fenómenos geológicos y la especial acomodación a los cambios de la naturaleza de cada elemento, constituyen los principios fundamentales de la Geología, sin cuyo conocimiento no podrían ser comprendidos la mayoría de los hechos que tienen su asiento en la corteza terrestre.

## CAPÍTULO IV

### MOVIMIENTOS DE LA CORTEZA

#### I. ACTIVIDAD DEL INTERIOR DE LA TIERRA

##### Hundimientos y levantamientos

El examen, por superficial que sea, de la corteza terrestre, sugiere inmediatamente la idea de inestabilidad. Una vez son los titánicos esfuerzos del pueblo holandés para salvar sus costas amenazadas desde hace siglos por la constante invasión del mar; otra el ya citado levantamiento de la Península Escandinava, o los restos de seres marinos encontrados en la cima de las altas montañas.

La Geología Histórica demuestra, en efecto, que la distribución de tierras y mares no ha sido siempre igual a la que hoy conocemos; el mapamundi actual representa sólo por un instante la configuración de la superficie terrestre. Pero estos cambios gigantescos que han debido de producirse siempre y que todos los geólogos admiten, han sido con seguridad enormemente lentos, y es de suponer que continúan siéndolo en la actualidad. Sin embargo, a pesar de que esa noción arraigó bien pronto en el espíritu de los primeros investigadores, son raras las observaciones sobre movimientos continentales visibles, debido sin duda alguna, en primer lugar, a la lentitud de esos movimientos difícilmente apreciables por una sola generación, y, en segundo término, a la dificultad de encontrar un punto fijo al cual referir las oscilaciones terrestres. Por esta causa, los primeros movimientos bien comprobados se relacionan con desplazamientos de la línea de costa causados por movimientos verticales, que han determinado en unos casos la inundación de regiones conocidas históricamente y en otros el progreso de las áreas continentales. Estas oscilaciones lentas de la corteza terrestre se designan con

el nombre de *movimientos epirogenéticos* (de *epeiros*, continente).

No obstante las dificultades de observación, se conocen numerosos ejemplos de movimientos continentales perfectamente comprobados. El caso más demostrativo por su claridad es el del templo romano de Serapis, en Puzzuoli, cerca de Nápoles, en el cual se observan unas columnas perforadas por moluscos litófagos marinos hasta unos dos metros de altura; esto indica que el templo quedó sumergido después de su construcción, y según datos históricos ciertos emergió en 1538 coincidiendo con la última erupción del Monte Nuovo. Pero el caso más conocido y uno de los mejor estudiados de levantamiento continental es el de la Península Escandinava, observado ya en el siglo XVIII por Celsio, Linneo y Svedenborg. En innumerables lugares de esa península se observan huellas evidentes de la acción del oleaje, grutas litorales, acantilados en seco y playas de guijarros conservadas en pleno bosque hasta los 280 metros de altura sobre el nivel actual de las aguas marinas. Los geólogos escandinavos han trazado con toda precisión el mapa indicador de estos cambios litorales producidos por el levantamiento secular de la península, ininterrumpido desde los tiempos prehistóricos. Los trabajos más recientes acreditan que la intensidad de la emersión es máxima en el centro del golfo de Botnia y a partir del siglo XIX alcanza cerca de 10 milímetros anuales. En las costas levantinas y meridionales de la Península Ibérica existen también magníficas playas levantadas o *terrazas marinas* a diversas alturas sobre el actual nivel del mar.

Uno de los ejemplos más interesantes de oscilaciones litorales con tendencia al hundimiento es el ya citado de las costas de los Países Bajos, los cuales han visto desaparecer bajo las aguas del océano más de 4.000 kilómetros cuadrados de su superficie. La primera etapa de esta inmersión se produjo en la época romana, originándose el lago Flevo por el que podían navegar los barcos; más tarde, entre el siglo XII y el XIV, nuevos hundimientos pusieron en comunicación el antiguo lago con el mar, formando el actual Zuiderzee. Algo parecido ocurrió en Bélgica: el 18 de noviembre de 1421, las aguas rompieron las murallas arenosas de la costa e invadieron el fértil territorio del Waard, que se exten-

día a orillas del Mosa; veintiocho pueblos sucumbieron, y dos ciudades, Geertruidenberg y Dortrecht, padecieron tan cruelmente que la primera de ellas no pudo levantarse de nuevo. Ostende mismo ha tenido que mudar varias veces de sitio; en el siglo I antes de Jesucristo, el actual lugar de emplazamiento estaba a 7 kilómetros del mar; cuatro siglos después se encontraba a la misma distancia de la costa, pero esta vez dentro del mar; y en el siglo X se hallaba ya otra vez sobre tierra firme para ser amenazada nuevamente por el oleaje dos siglos y medio más tarde. En las costas de Bretaña, no lejos de Marsella, y en diversos puntos del litoral mediterráneo, se conocen casos de ciudades sumergidas o de valles inundados. En la Península Ibérica se advierten patentes fenómenos de hundimiento en el litoral cantábrico y gallego; en la bahía de Cádiz, cerca de la isla de Sancti Petri, se han reconocido ruinas sumergidas del famoso templo de Hércules, y asimismo de otras edificaciones frente al Castillo de Santa Catalina y al de San Sebastián; las minas de Salmedina, antigua Eborá, situadas en la desembocadura del Guadalquivir, han desaparecido igualmente debajo de las aguas.

Muchas veces, los desplazamientos de la línea de costa, más que a verdaderos movimientos verticales son debidos a la acción del oleaje y de las corrientes marinas, que arrastran los sedimentos poco coherentes de las playas, y en otros casos se deben, por el contrario, a los acúmulos aportados por los ríos. Así, en la mencionada costa de hundimiento del golfo de Cádiz, los aportes del Guadalquivir han rellenado el antiguo golfo o *Lacus Licustinus* de la época romana, el cual se extendía hasta cerca de Sevilla. Los aportes de los grandes ríos, como el Amazonas, el Orinoco, el Magdalena, etc., en América del Sur, han colmatado extensos golfos todavía existentes en épocas muy remotas. En cambio, la acción erosiva de las corrientes marinas parece ser la causa de la desaparición de las playas del litoral catalán al Norte de Barcelona, en donde ha sido necesario rectificar el trazado del ferrocarril por haberse llevado el mar las magníficas playas con caseríos y astilleros que antes existían.

La Geología Histórica demuestra que los movimientos epirogenéticos se han producido constantemente en el

transcurso de los períodos geológicos, siendo conocidos, como ya se ha dicho, con los nombres de *transgresiones* y *regresiones*.

### Causas de los movimientos epirogenéticos

Refiriéndose la mayor parte de los casos debidamente comprobados a desplazamientos de la línea de costa, cabe preguntar si estas oscilaciones son debidas a hundimientos o levantamientos de una dovela continental, o bien, por el contrario, si se trata de una variación del nivel absoluto de los mares.

El genial geólogo alemán Suess, en su obra magistral *La Faz de la Tierra*, piedra angular de la moderna Geología, planteó la posibilidad de variaciones generales del nivel del océano, que designa con el nombre de *movimientos eustáticos*. Las oscilaciones generales podrían obedecer a muy diversas causas, tales como la producida por la atracción que los grandes macizos continentales deben de ejercer sobre la masa oceánica; asimismo un aumento de la velocidad de rotación de la Tierra provocaría un aflujo de agua en el ecuador, y su disminución un aflujo sobre los polos. Ciertos fenómenos geológicos dependientes del nivel de los mares han aportado pruebas en favor de la interpretación eustática; así la coincidencia de alturas en los antiguos cursos fluviales de cuencas muy alejadas y sometidas a procesos orogénicos variados, descarta la posibilidad de causas meramente locales, como sería el levantamiento de un fragmento cortical. Esto explica que la teoría eustática tenga en Francia, por ejemplo, entusiastas defensores.

En cambio, para Haug, los movimientos epirogenéticos, transgresiones y regresiones, no son más que manifestaciones íntimamente ligadas con los movimientos de elevación o descenso de regiones de plegamiento de la corteza terrestre. Así ha podido demostrar:

1.º Que las transgresiones no se producen alternativamente en ambos hemisferios, sino que tienen lugar simultáneamente en las regiones polares y en las regiones ecuatoriales.

2.º Que no se localizan en determinadas latitudes, sino que tienen lugar simultáneamente en las regiones polares y en las ecuatoriales.

3.º Que no son universales.

Como complemento de estos hechos, Haug ha observado por vez primera que cuando en una serie estratigráfica existen lagunas regionales debidas a una emersión temporal, esas lagunas son completadas por depósitos marinos en las zonas continentales próximas. Estas relaciones vienen expresadas por las siguientes leyes:

Siempre que un término determinado de la serie sedimentaria es transgresivo en las áreas continentales, el mismo término es regresivo en los geosinclinales, y recíprocamente.

Siempre que un término es transgresivo en los geosinclinales es regresivo en las áreas continentales.

Estas leyes se hermanan estrechamente con las ideas que se tienen acerca de los movimientos de la corteza. En efecto, cuando la erosión descarga las masas continentales, éstas pierden de peso y se elevan, mientras el fondo de los geosinclinales se hunde por la sobrecarga recibida (capítulo V).

### Dislocaciones de la corteza

Los desplazamientos continentales, ese movimiento a la deriva de los grandes bloques epíricos, ora estrangulando los mares, ora dilatando la extensión de los océanos, han debido de existir siempre. Podrá ponerse en duda la magnitud de esos desplazamientos y si son la causa fundamental de la génesis de las montañas; podrá discutirse la forma de actuar; podrán estructurarse nuevas teorías sobre la causa determinante de esos colosales esfuerzos; podrá la Geofísica aportar nuevos descubrimientos a los que las teorías orogénicas habrán de acompañar el ritmo de sus ideas; pero la existencia de presiones laterales, que, obrando sobre la corteza terrestre, han apretujado entre las gigantescas tenazas continentales los sedimentos depositados en el fondo de los océanos obligándoles a doblarse y a replegarse de mil modos, es un hecho definitivamente adquirido por la ciencia geológica. De otra forma no sería posible explicar cómo los 250 kilómetros de anchura de los Alpes se transformarían al extender sus capas en una planicie de 1.200 kilómetros de amplitud, y lo propio ocurriría con todas las cordilleras y relieves principales de la

Tierra: Andes, Pirineos, etc.; las capas del Himalaya, por ejemplo, alcanzarían unos 6.000 kilómetros de anchura.

Allí donde es posible examinar la estructura de la corteza, y más particularmente en trincheras y cortes naturales del terreno, es muy frecuente observar que los estratos, que en otros tiempos fueron depositados horizontalmente en el seno de las aguas lacustres o marinas, se hallan muy lejos de guardar la disposición y regularidad primitivas. A pesar de la rigidez aparente de las rocas, los estratos aparecen replegados y fracturados de modo muy diverso; prueba fehaciente de las presiones que han sufrido. La parte de la Geología denominada *tectónica morfológica o estática*, tiene precisamente por objeto el estudio de esas estructuras y dislocaciones, en tanto que la *tectónica dinámica* se ocupa de las causas que han determinado su aparición. Es preliminar indispensable al estudio del origen de las montañas el conocimiento de estas disposiciones estructurales.

### Plegamientos

Cuando las capas han perdido la horizontalidad primitiva y están todas uniformemente inclinadas, se dice que forman un sistema *monoclinal* (fig. 7). Pero, con mucha frecuencia, las capas han sido además dobladas de

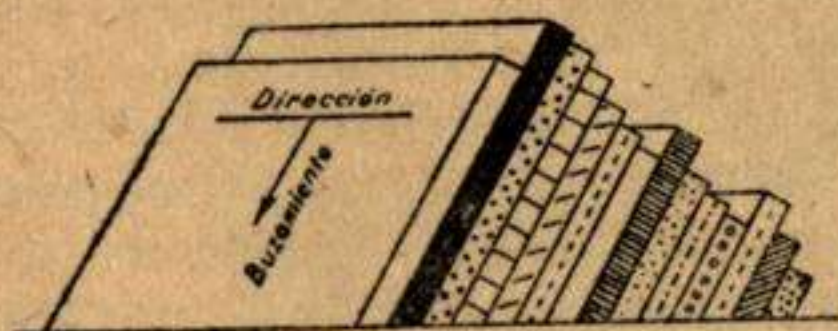


Fig. 7.—Sistema monoclinado.

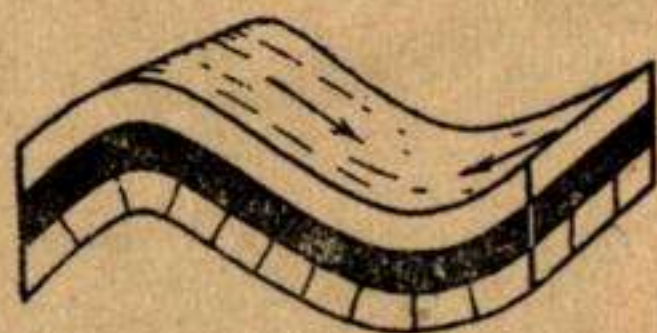


Fig. 8.—Pliegues anticlinal (parte superior convexa) y sinclinal (parte inferior cóncava).

una manera análoga a lo que sucede cuando apretamos entre las manos una hoja de papel: se origina una serie de ondulaciones, convexas unas, cóncavas otras, que en términos geológicos se llaman *anticlinales* y *sinclinales* respectivamente. En el primer caso, los estratos están inclinados en sentido contrario, y eso quiere decir etimológicamente la palabra *anticlinal*, mientras

que en el segundo están inclinados hacia una misma dirección; en términos técnicos se dice que las capas *buzan* hacia una u otra dirección (fig. 8).

Los pliegues reciben distintos nombres según el grado de inclinación de sus flancos; así se habla de pliegues *simétricos o verticales, asimétricos o inclinados y acos-*



Fig. 9.—Pliegues inclinados y pliegues acostados.

*tados*, según indica bien claramente la figura 9. Si una capa horizontal se dobla para colocarse otra vez horizontal, se forma otro tipo de pliegue llamado *flexión o pliegue monoclinal* (fig. 10).

Tanto en este caso como en el de los pliegues inclinados, uno de los flancos puede laminarse tanto por estiramiento que se rompa y llegue a desaparecer; en este caso se tiene el llamado *pliegue-falla*. Si éste es inclinado, tiene por consecuencia que capas más antiguas descansan sobre otras más modernas (*cabalgamiento*), y si el empuje ha sido muy violento, las materias plásticas que pueden existir en el interior del pliegue, tales como las margas, arcillas o yesos, pueden obrar a

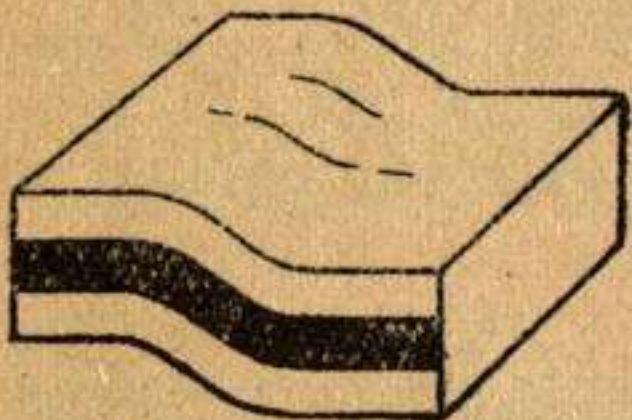


Fig. 10.—Flexión o pliegue monoclinal.

la manera de lubricante y permitir el deslizamiento de una masa rocosa sobre otra en muchos kilómetros de distancia, hasta el punto de llegar a desconocer las raíces del pliegue; esta disposición recibe el nombre de *corrimiento* (fig. 11). De este tipo de pliegues se cree muy fundadamente que son algunas de las mayores montañas de la Tierra, tales como los Alpes, suponiéndose que toda la mole inmensa de esta cordillera procede del África, que empujó los materiales del antiguo Tetis, el actual Mediterráneo, sobre el continente europeo.



PLEGAMIENTOS DE LA CORTEZA

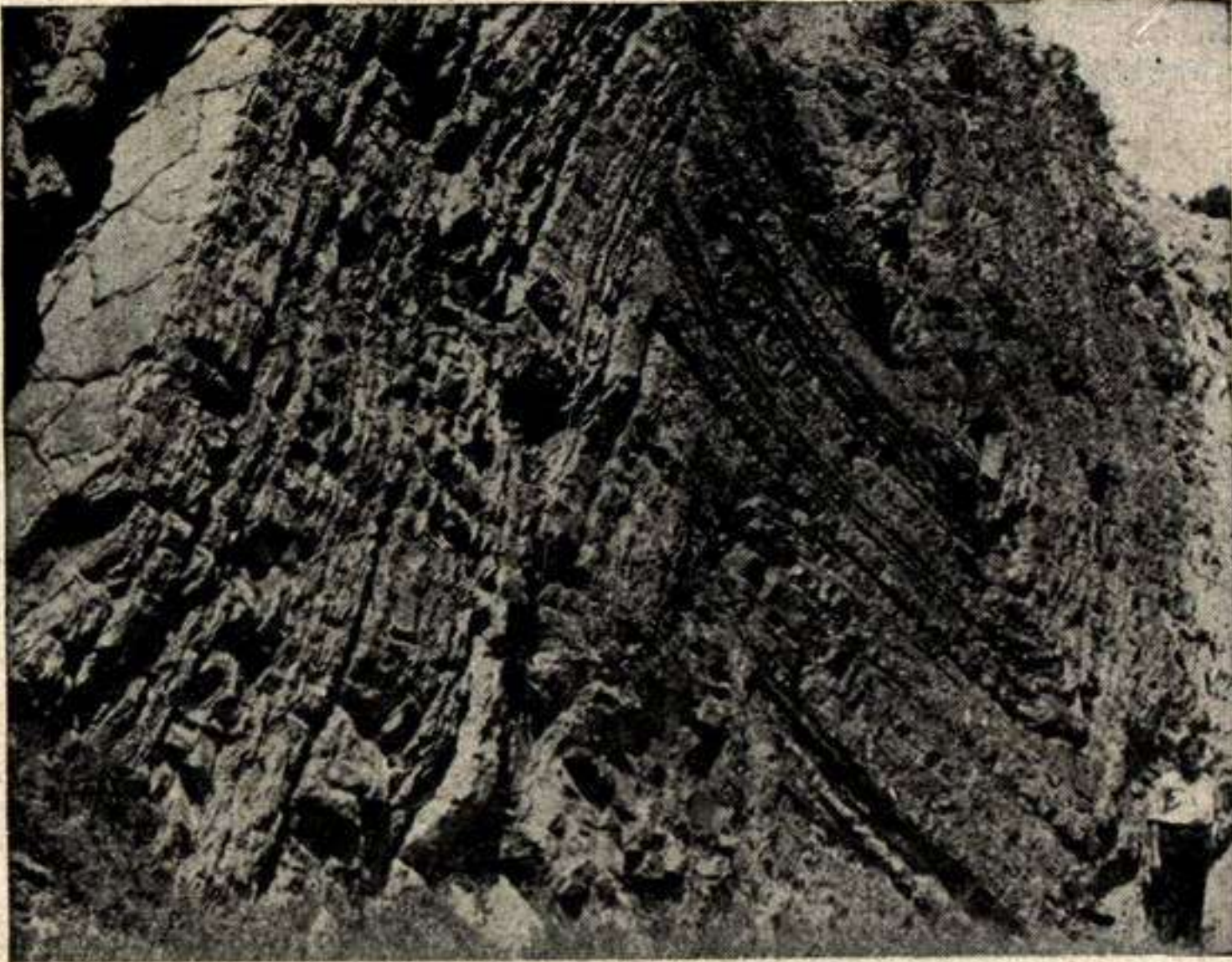


FIG. 1. — Pliegues verticales en el oligoceno de la Sierra de Montclar (Lérida).  
(Foto. Solé)



FIG. 2. — Pliegues inclinados en las pizarras del Tibidabo (Barcelona).  
(Foto. Solé)

LÁMINA IV

PLEGAMIENTOS DE LA CORTEZA



Pliegue-falla en los conglomerados oligocénicos de la Sierra del Montsant (Tarragona)  
(Foto. Solé)

La plasticidad o rigidez de las rocas que intervienen en la formación del pliegue tiene también su influencia en la morfología del mismo. Así, cuando una serie muy plástica, yesos, sal, arcillas, etc. sostiene una serie más rígida y ambas son comprimidas lateralmente, la inferior, que reacciona inmediatamente, se abomba y rompe



Fig. 11.—Transformación de un pliegue inclinado en pliegue-falla y corrimiento por presión unilateral.

la cobertera rígida, produciéndose a manera de una intumescencia o *tumor*. Tales pliegues se llaman *diapíricos*, teniendo el fenómeno del *diapirismo* una enorme importancia económica para la investigación de los yacimientos de sal y petróleo.

### Fallas y fracturas

Además de las deformaciones y plegamientos producidos por presiones laterales, se observa en los estratos dislocaciones o roturas producidas por fuerzas que actúan según la vertical y que provocan hundimientos o levantamientos de dovelas continentales. En estas circunstancias, cuando un fragmento cortical se hunde o se levanta, los estratos pueden amoldarse a esa desnivelación describiendo una flexión; pero, de ordinario, la elasticidad de las rocas no es suficiente para consentir estos dobleces cuando la desnivelación es muy grande. En este caso las capas se quiebran y pierden su continuidad, pues una parte de la formación queda elevada con relación a la otra. Esta disposición, debida a movimientos *verticales*, recibe el nombre de *falla*, y se llama *altura o salto de falla* a la diferencia de nivel entre dos estratos idénticos (fig. 12).

Acostumbrados a los moderados movimientos verticales que la epirogénesis registra, se requiere ciertamen-

te un poderoso esfuerzo de imaginación para reconstruir esos gigantescos desplazamientos verticales, a veces de algunos miles de metros, de que hablan los geólogos. Sin embargo, existen fallas fáciles de reconocer porque imponen al paisaje un sello típico, caracterizado por cantiles más o menos elevados según sea la nivelación sufrida. Así, por ejemplo, el de Montjuich, que cae verticalmente sobre el puerto de Barcelona, y el mogote de Jibraltar, son escarpes de falta de dovelas hundidas en el mar. Otro ejemplo típico de fallas bien

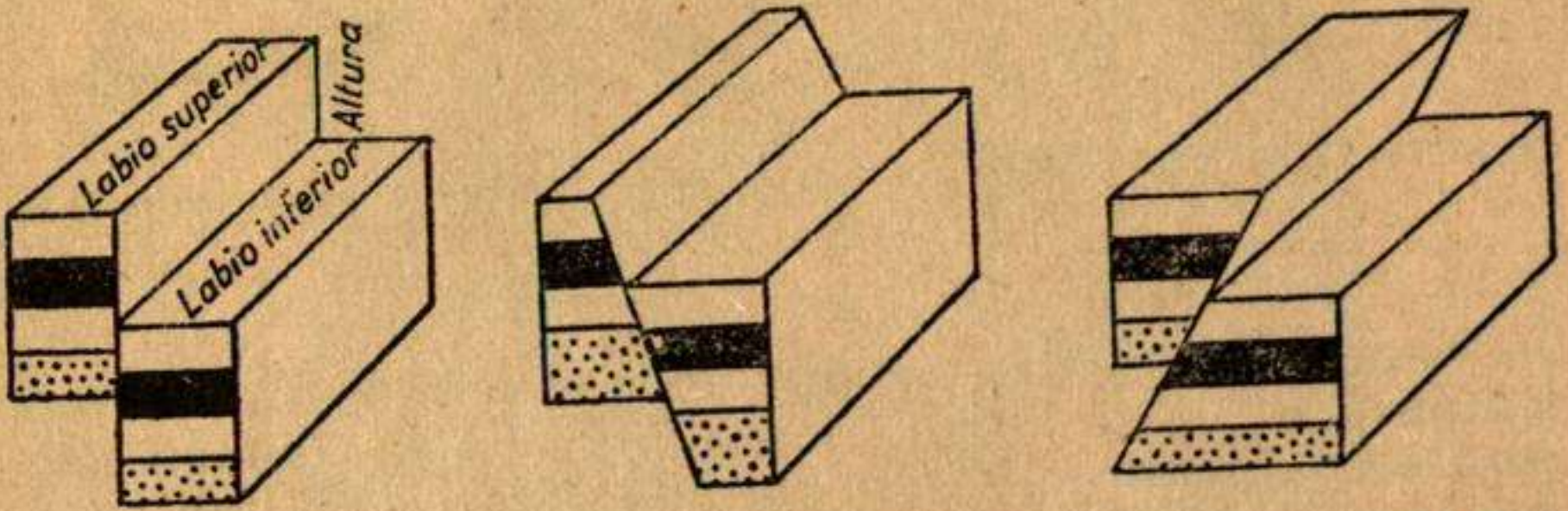


Fig. 12.—Clases de fallas: falla normal, falla directa y falla inversa.

destacadas en el paisaje es el que determina la serie de fallas en los lagos escalonados del Oregón y del Canadá, jalonadas cada una de ellas por rápidos o por cascadas. Otras veces, por el contrario, pasan inadvertidas por el turista. Así dice Suess: «Ningún indicio denota en el monótono país de colinas de Prizbraun la existencia de la falla de Letlen, esa potente superficie de dislocación que atraviesa los diques argentíferos que allí existen y que se abre hasta una profundidad de más de 1.000 metros. Esto es debido a que el borde levantado, que emerge en escarpe, es atacado duramente por la erosión que desgasta y suaviza los bordes cortantes y acaba nivelando el escalón». Cuando esto ocurre, se puede asegurar que después de la producción de la falla ha habido un período de intensa actividad erosiva.

Pero en uno y otro caso, las fallas constituyen el accidente tectónico de mayor importancia económica en minería. Frecuentemente, los filones metalíferos se encuentran fallados y el ingeniero de minas, para seguir

la pista de las venas que desaparecen frente a una línea de fractura, se ve obligado a investigar el sentido y dirección de los desplazamientos verticales.

Según que el plano por el que se ha verificado el resbalamiento sea vertical o inclinado, la falla recibe el nombre de *falla vertical* o el de *falla oblicua* respectivamente, distinguiéndose todavía en este último caso la *falla directa* e *inversa* según que el plano de falla esté inclinado en el mismo sentido de buzamiento de las capas o en sentido contrario. Y todavía puede distinguirse el caso en que el desplazamiento de los bloques se haga en sentido horizontal, en cuyo caso puede llamarse *dislocación* o *fractura (décrochement)*.

Los materiales que forman los macizos más antiguos de la Tierra suelen ser extremadamente frágiles a causa de las compresiones sufridas, y por eso, perdida la elasticidad, los empujes orogénicos provocan en ellos una verdadera trituración del roquedal, con fallas múltiples

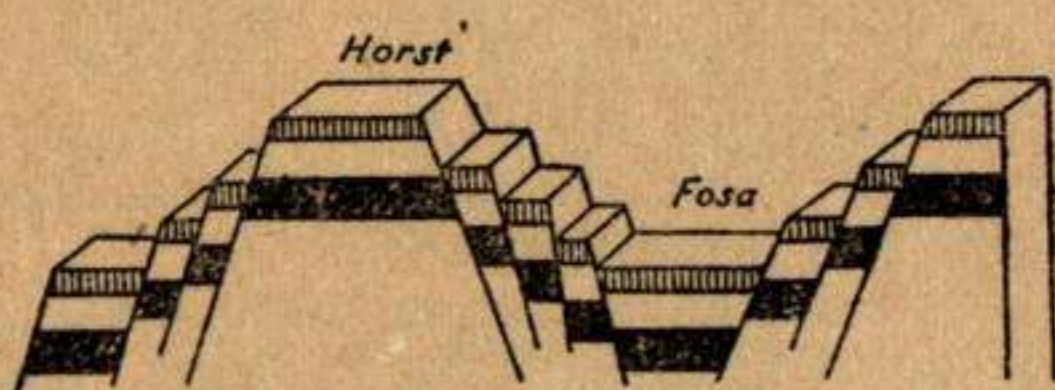


Fig. 13.—Fallas en escalera.

arrumbadas en una o varias direcciones. En estas circunstancias se producen campos hundidos, que reciben el nombre de *fosas tectónicas* (fig. 13), limitados por dovelas elevadas, regiones de enorme interés geográfico y humano, siendo unas veces más hondas que el nivel del mar, y, por tanto, privadas de avenamiento oceánico (Mar Muerto en Palestina, mar Caspio, fosas australianas, y del Colorado en los Estados Unidos, etc.), mientras otras veces son llanuras fértiles y codiciadas por su riqueza, tales como la depresión prelitoral catalana o las translitorales chilena y californiana, estas últimas de varios miles de kilómetros de longitud.

El ejemplo clásico de fosa tectónica es la depresión del Rin, bordeada por los macizos de los Vosgos, y la Selva Negra, hundidos por fallas de más de mil metros de escalón.

A veces, por el contrario, las fallas escalonadas limitan bloques o pilares levantados, sostenidos por contrafuertes hundidos, recibiendo entonces el nombre de *horst*, como las montañas del Harz, en Alemania, o la Meseta Española.

### Tipos de montañas

En el sentido popular, toda prominencia destacada del terreno constituye una montaña, pero en el campo estrictamente científico conviene precisar este concepto.

Para el geólogo, y aun para el geógrafo, las cordilleras o cadenas de montañas son los relieves producidos por el plegamiento o la fractura de los estratos. De tal forma, que no puede hablarse de montañas en terrenos de capas horizontales; en este caso los desniveles existentes se deben simplemente a los efectos producidos por la erosión, por lo que rara vez alcanzan proporciones gigantescas. En cambio, las grandes alineaciones montuosas resultan de potentes esfuerzos endógenos que han alterado la primitiva horizontalidad de las formaciones sedimentarias.

Tanto desde el punto de vista geológico como desde el geográfico, se distinguen dos clases fundamentales de alineaciones montañosas: las de *tipo germánico*, caracterizadas por el predominio de dislocaciones o fracturas, y las de *tipo alpino*, que se caracterizan por la preponderancia casi exclusiva de formas de plegamiento.

En la orogénesis de tipo germánico figuran las *mese-tas* o *macizos*, que son antiguas regiones plegadas de la Tierra que luego han sido profundamente erosionadas. Debido al desgaste sufrido presentan formas seniles, y coronan sus cimas extensas penillanuras. En oposición a esta caducidad exterior, y gracias a inyecciones magmáticas y al metamorfismo consiguiente, sus estratos se han endurecido en grado tan extraordinario que forman un conjunto homogéneo de gran consistencia. Las olas orogénicas se estrellan contra estos macizos resistentes, como las olas del mar contra los cantiles de la costa. El empuje orogénico se transmite a través del macizo casi sin modificarlo, pues los estratos, a consecuencia de la rigidez uniforme impuesta por

el metamorfismo, han perdido su plasticidad; los impulsos máximos sólo llegan a producir en la mole ligeros abombamientos escutiformes, y en algunos casos, rebasado el límite de elasticidad, fracturas de importancia; pues otra de las propiedades de estos macizos montañosos es la fragilidad, cualidad que, como en el vidrio, es compañera de la rigidez y de la dureza. Por eso es frecuente en los macizos antiguos la existencia de fosas o depresiones largas y estrechas producidas por el hundimiento de dovelas falladas. La depresión prelitoral catalana, la fosa del Rin y la depresión Calatayud-Teruel en el Sistema Ibérico, son buenos ejemplos de esta clase de accidentes tectónicos. También es frecuente que a través de las líneas de fractura se desarrollen erupciones volcánicas importantes, como las de la Auvernia en el macizo central francés, etc.

En la historia geológica de la Tierra, todas las cadenas de montañas engendradas con anterioridad a la Era Terciaria han sido ya arrasadas y convertidas en penillanuras meseteñas (Meseta Española, Macizo Central Francés, Vosgos, Ardenas, Selva Negra, etc.).

A veces, después de su emersión y arrasamiento, las dovelas falladas han sufrido de nuevo una suave inmersión, en virtud de la cual se depositaron tenues espesores de capas sedimentarias encima de la mole arcaica. Al impulso de un nuevo empuje orogénico, los materiales del macizo antiguo y la tenue cobertera moderna reaccionan de muy distinta manera. Los primeros, perdida su elasticidad, se quiebran, mientras los segundos, todavía plásticos y móviles, forman un manto plegado. Cuando los desniveles producidos por las fracturas del substrato rígido rebasan ciertos límites, la cobertera plegada acaba también por quebrarse, en cuyo caso se origina una clase de orogénesis intermedia entre las formas de tipo genuinamente germánico, en las que predominan las fracturas, y las de tipo alpino, constituidas exclusivamente por plegamientos. Son las llamadas de plegamiento y de fractura.

En la orogénesis de tipo alpino figuran las *sierras* o *cordilleras* propiamente dichas, que son las únicas que en la actualidad elevan a grandes alturas sus formas enérgicas. Nacidas al impulso del último paroxismo orogénico, acaecido al principio de la Era Terciaria, con-

servan todavía sus rasgos juveniles que jalonan crestas y picachos de formas abruptas y escarpadas. En ellas asientan principalmente los fenómenos sísmicos y volcánicos, y, en general, la inmensa mayoría de las zonas lábiles de la Tierra.

Las cordilleras alpinas se formaron a expensas de materiales muy plásticos que se plegaron intensamente al recibir el empuje orogénico. Según la forma de los pliegues se distinguen dos tipos fundamentales. Uno, del cual es buen ejemplo el Jura, constituido por una serie de ondulaciones sencillas, los pliegues anticlinales y sinclinales, desarrollados *in situ*, es decir, en el mismo lugar en que se depositaron los estratos: por eso se dice de estos plegamientos que son *autóctonos*. Otro, del cual son prototipo los Alpes, que se forma por acumulación de pliegues que han sido separados de sus raíces y transportados lejos del lugar de origen; por eso éstos reciben el nombre de *alóctonos*. Se trata de corrimientos de gran envergadura que alcanzan a veces centenares de kilómetros. Ordinariamente el transporte de la masa sedimentaria se ve facilitado por la presencia de algún tramo arcilloso o yesífero que obra como lubricante y permite el deslizamiento de los estratos superiores plegados.

Se comprende que el esfuerzo orogénico realizado en uno y otro caso tiene que ser forzosamente de muy distinto valor. En el primero, los estratos sólo fueron ondulados, mientras que en el segundo no sólo se plegaron, sino que fueron arrancados y transportados a enormes distancias. Por eso las grandes cordilleras, Alpes, Himalaya, Cordillera Bética, etc., suelen estar formadas por acúmulos de pliegues alóctonos.

Las masas transportadas se dice que forman *capas de corrimiento* y en ellas se distinguen tres partes esenciales: el *frente*, el *manto* y las *raíces* (fig. 14).

El frente de la capa es la charnela del pliegue anticlinal dirigido hacia adelante, en el sentido de la traslación; las raíces se hallan en el lugar donde se ha originado el plegamiento, y el manto o caparazón está formado por las capas superiores del pliegue. La erosión, muchas veces, acaba por destruir buena parte del manto, dejando tan sólo algunos *testimonios* o *klippes* de terrenos antiguos que reposan sobre otros más modernos. Aun cuando el manto sea continuo y no aflo-



ren los terrenos modernos que arman debajo, frecuentemente la erosión abre alguna brecha o *ventana tectónica* que permite reconocer el substrato más moderno. Por último, en su movimiento de arrastre, el pliegue que se traslada puede englobar fragmentos de las rocas infrayacentes, los cuales reciben el nombre de *láminas de corrimiento*.

Los Alpes ofrecen el ejemplo clásico, descrito en todos los tratados de Geología, de una cordillera formada



Fig. 14.—Partes de un plegamiento de tipo alpino (Martonne);  
1 y 2 substrato antiguo autóctono.

por capas de corrimiento. Debido al empuje del continente africano sobre Eurasia, se originaron cinco capas de corrimiento que reciben los nombres de *Dináridas*, *Tirólidas*, *Pénnidas*, *Grisónidas* y *Helvétidas*, las cuales se amontonaron en los bordes de los viejos macizos centroeuropeos, substrato autóctono que aflora solamente en la región del Montblanc; el resto de los Alpes, incluso los macizos graníticos del Hohe Tauern, en Austria, están desenraizados y proceden del Sur.

Independientemente de la estructura íntima de los pliegues, en toda cordillera alpina se distinguen las siguientes partes:

1. El *antepaís* y el *postpaís*, o sea los macizos que han obrado de topes de prensa en la formación de la cordillera. En el caso de los Alpes son los macizos de Europa Central y la Meseta Sahariana.

2. Los *bordes montañosos* de los expresados macizos marginales, los cuales han sido comprimidos también por el oleaje orogénico y han formado una orla

marginal plegada y fracturada de tipo germánico, que recibe el nombre de *cordillera de antepaís*.

3. La *prefosa* o depresión paralela a la cordillera principal que se interpone entre ésta y su antepaís. La depresión del Guadalquivir se interpone entre la Meseta Española y la Cordillera Bética. La depresión del Ebro y la de Aquitania se intercalan entre la Cordillera Pirenaica y la Meseta Española y el Macizo Central francés, respectivamente.

4. Muchas veces, la cordillera central se desdobra en dos ramas paralelas o algo divergentes, entre las cuales se intercala otra depresión, la *interfosa*. Ejemplos: la depresión de Hungría entre los Cárpatos y los Balcanes, y el Mediterráneo occidental entre el plegamiento bético y el rifeño.

En resumen, pues, en todo plegamiento alpino se distinguen: a) los macizos antiguos con sus bordes arrugados; b) las prefosas intercaladas entre el plegamiento central y los macizos, y c) la cordillera alpina propiamente dicha, que ocupa el centro del sistema, la cual puede ser sencilla o doble, en cuyo caso lleva una depresión o altiplanicie intermedia.

Conocida esta estructura típica de los plegamientos alpinos, los geólogos tectonicistas discuten en la actualidad el trazado de los arcos de plegamiento alpino y tratan de identificar las cordilleras terciarias con las diversas partes del esquema fundamental esbozado. El paso de los *Alpides*, como también se llama a los plegamientos alpinos, por la Península Ibérica ha dado lugar a reñidas controversias y a diversas soluciones, siendo uno de los temas más apasionantes que plantea la geología del solar hispánico (Véase *Apéndice*).

De lo expuesto se deduce que no existen diferencias genéticas esenciales entre las formas alpinas y las germánicas. Las fuerzas orogénicas obran siempre de la misma forma. La diferencia estriba únicamente en la distinta capacidad receptiva de los materiales sometidos al paroxismo tectónico. Si éstos son móviles y plásticos, se pliegan y dan lugar a formas alpinas: en cambio, si el metamorfismo les ha comunicado rigidez y dureza, los materiales se quiebran y dan lugar a las formas germánicas.

## CAPÍTULO V

### GÉNESIS DE LAS MONTAÑAS

La estructura de la corteza terrestre demuestra plenamente que los materiales que la constituyen han sufrido presiones gigantescas que han plegado y fracturado innúmeras veces los estratos que se depositaron horizontalmente en el fondo de los mares. Sin embargo, sólo después de un poderoso esfuerzo de imaginación aceptamos que masas de espesores enormes fueran arrancadas de lugares situados a millares de metros de profundidad para ser elevadas hasta las cimas recubiertas por las nieves eternas, o que bloques continentales enteros hayan sido lanzados unos contra otros para comprimir entre tan formidables tenazas los sedimentos oceánicos. Por esto, sin duda, en el afán humano por la posesión de la Verdad, el mecanismo de la formación de las montañas ha torturado a los hombres de ciencia de todos los tiempos.

Sin esas conmociones orogénicas, nada hubiera impedido la repartición de los materiales terrestres en una serie de envolturas concéntricas de densidad decreciente desde el núcleo metálico a la cubierta gaseosa atmosférica. La gravedad, según se ha visto, es la fuerza que impuso a los materiales de la nebulosa primitiva esa tendencia a agruparse por orden de densidades; los más pesados en el centro, los más ligeros en la periferia. El relieve continental rompe esta distribución regular; pues si aquél no existiera, la hidrosfera formaría una capa continua sobre la corteza sólida. Es, pues, únicamente en la zona de contacto de las envolturas gaseosa, líquida y sólida donde se observan tales anomalías. ¿Cuál puede ser la causa de esta alteración tan discordante con la regular estructura que

ofrece el resto del Globo, tanto en la endosfera como en la atmósfera? ¿Radica en la Tierra misma, o, por el contrario, es debida a una influencia exterior a ella? ¿Será producto de la energía interior de nuestro planeta? ¿Será simplemente resultado de una acción mecánica de origen cósmico, como la atracción lunar o la rotación terrestre, puesta en evidencia en la superficie de contacto de medios de densidad tan diversa? He aquí la cuestión fundamental que plantea el problema orogénico: el origen de la energía capaz de producir tan colosales manifestaciones.

Son numerosísimas las hipótesis ideadas para explicar la génesis de las montañas y de los plegamientos. La sencillez de las primeras concepciones haría hoy sonreír al menos versado en cuestiones geológicas, y, sin embargo, más de una vez los modernos derroteros de la ciencia se han inclinado de nuevo hacia antiguas teorías caídas en desgracia. Así aparece con la mano-seada y conocida hipótesis de la contracción del núcleo, resucitada en estos últimos tiempos por competentísimos geólogos. Esto enseña que en la ciencia no hay nada definitivo ni inmutable; cada teoría ha servido para explicar en un momento determinado los hechos hasta aquel entonces conocidos, y cada nuevo descubrimiento de orden geofísico o geológico ha requerido un reajuste de las hipótesis anteriormente establecidas. Por eso al principio, siendo desconocido el estado del interior de la Tierra, las teorías orogénicas adelantaron con pasmosa lentitud y sólo trataban de explicar los problemas que la estructura geológica planteaba. Ha sido de poquísimos años a esta parte, menos de lo que va de siglo, que los modernos métodos geofísicos de investigación, al ir descubriendo las características de la endosfera terrestre, han permitido sentar bases mucho más sólidas sobre la formación de las cordilleras de montañas. En esta segunda fase evolutiva, las teorías orogénicas se suceden vertiginosamente.

### **Localización del fenómeno orogénico; concepto de geosinclinal.**

Pero antes de pasar adelante es preciso sentar un hecho que es fundamental en orogenia. Las montañas no

emergen indistintamente en cualquier parte de la Tierra; jamás se formaron sobre los continentes, ni en mares *epicontinentales* o de escasa profundidad; sino que, por el contrario, siempre se han constituido a expensas de enormes espesores de sedimentos depositados en océanos muy profundos. En efecto, casi todas las formaciones que integran las cadenas de montañas, son de facies batial (Capítulo II), según acreditan la naturaleza litológica de los sedimentos y los restos orgánicos (fósiles) que encierran, los cuales corresponden a animales que sólo se desarrollaron en aquellas profundidades máximas.

Aceptado este hecho como indiscutible, es preciso admitir que el fondo de dichas cuencas oceánicas se iba hundiendo a medida que aumentaba el aporte sedimentario. De otra forma no se explicaría cómo se depositaron formaciones de miles de metros de espesor bajo una facies constante, o lo que es igual, a una misma profundidad. De no haber ocurrido aquel hundimiento lento y continuo del fondo oceánico, únicamente podrían tener carácter batial los sedimentos de la base de la formación, mientras los más superiores, a medida que se colmataba la cuenca oceánica, acabarían convirtiéndose en sedimentos de facies nerítica. Dana nomina *geosinclinal* a esas cuencas alargadas y de profundidad máxima en donde, gracias a un lento hundimiento, pudieron acumularse potentes masas sedimentarias. Además, como los sedimentos de carácter batial se hallan siempre íntimamente plegados, Haug formula la siguiente ley: *Las cadenas de montañas se forman sobre los geosinclinales.*

Los geosinclinales nacen en zonas de escasa consistencia situadas ordinariamente entre dos macizos resistentes y estables: así, por ejemplo, los Alpes corresponden a un geosinclinal que se formó durante la Era Secundaria entre las mesetas centroeuropeas y el macizo del Sahara; Sierra Nevada es un fragmento del propio geosinclinal mediterráneo situado entre la Meseta Española y África. Si por una circunstancia cualquiera disminuye la distancia entre estos dos topes de prensa que bordean la cubeta marina, el geosinclinal es comprimido fuertemente, con lo cual los estratos se ven obligados a doblarse hacia arriba describiendo un gran pliegue convexo que se denomina *geoanticlinal*,

verdadero embrión de la naciente cordillera montañosa (fig. 15).

La noción de geosinclinal ha arrojado mucha luz sobre determinados fenómenos geológicos, y, en particular, acerca del origen de las rocas metamórficas y de las eruptivas.

En efecto, recuérdese que, en virtud del llamado *gradiente geotérmico*, a medida que aumenta la profun-

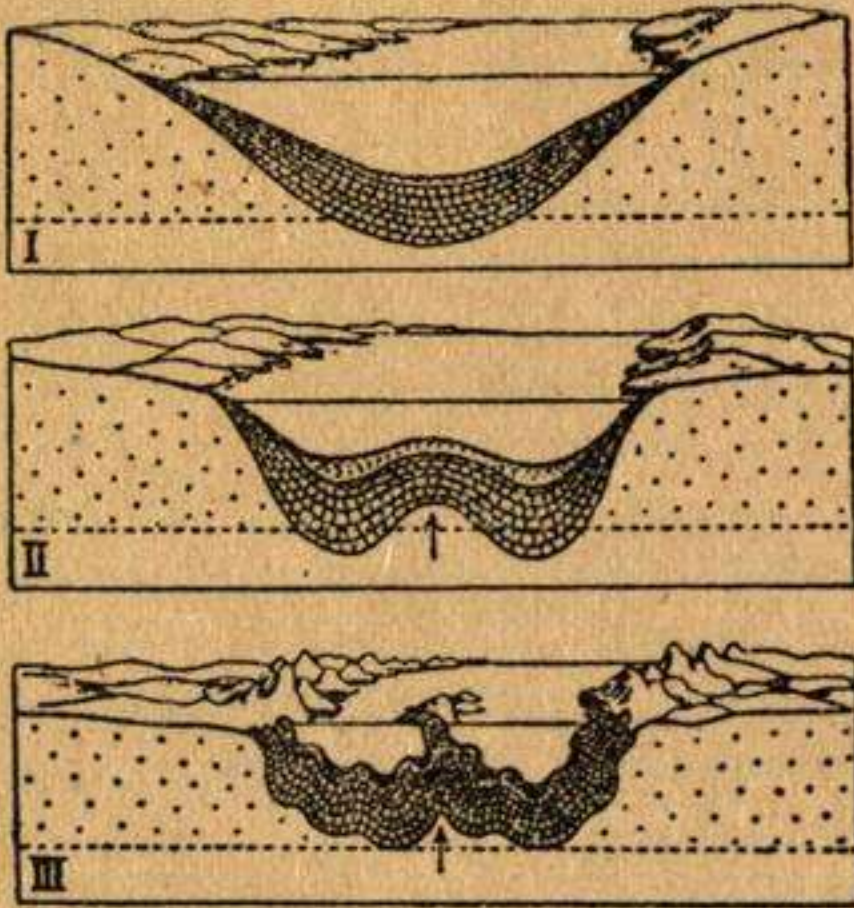


Fig. 15.—Formación de una cordillera a expensas de un geosinclinal (Chevalier).

dididad aumenta también la temperatura; en consecuencia, a causa del hundimiento lento del fondo de los geosinclinales, los sedimentos penetran paulatinamente en zonas cada vez de mayor temperatura y están sometidos a la presión resultante del peso de los sedimentos que continuamente se acumulan encima. Es decir, se encuentran en condiciones de presión y temperatura tales que sufren una completa transformación, en virtud de la cual cristalizan algunos de sus componentes, se originan otros nuevos (micas, granates, etc.)

y el conjunto adquiere la característica pizarrosidad propia de las rocas metamórficas.

Debido a las condiciones de formación de esta clase de rocas, las más transformadas serán las de la base de la formación y las menos alteradas serán las más superficiales, o sea las más lejanas de las regiones de temperatura y presión elevadas, hasta pasar, por tránsitos insensibles, a sedimentos normales.

En condiciones óptimas, el metamorfismo puede alcanzar el grado máximo. Entonces, a causa de las temperaturas elevadísimas, funde completamente la base del geosinclinal hasta que resulta un magma pastoso que se infiltra en las bóvedas de los pliegues, y allí, cuando emergiendo el geoanticlinal se aproxima a la superficie, se enfría lentamente, convirtiéndose en una

masa homogénea y cristalina: en granito, por ejemplo. Así, en virtud de este proceso, las rocas sedimentarias pueden llegar a magma eruptivo si para ello alcanzan una profundidad conveniente. Comprueba este supuesto el hecho observado que entre las rocas graníticas, y por tanto francamente eruptivas, que suelen formar la zona axial de las grandes cordilleras, y las pizarras indudablemente metamórficas que arman encima (figura 4) se intercala el *neis*, que es una roca de tránsito, de análoga composición mineralógica que el granito, pero con la esquistosidad propia de las pizarras metamórficas. En muchos casos, pues, entre las rocas eruptivas y las metamórficas no existen límites precisos que permitan separar unas de otras. Otro hecho que prueba el origen metamórfico de los batolitos eruptivos es la presencia, en el interior de la masa cristalina, de restos de pizarras que no han sido todavía totalmente digeridas.

Por consiguiente, el granito, y en general los grandes batolitos eruptivos que forman la base en que se apoyan las formaciones sedimentarias, no representan, como se creyó por algún tiempo, la primitiva corteza de solidificación de la Tierra, sino que de ordinario se originaron a expensas de los estratos metamórficos que se hallan en su contacto, y, por tanto, son posteriores a ellos. Por eso ha sido preciso rebajar en muchos casos la edad del granito, habiéndose comprobado la existencia de algunos muy modernos, incluso de la Era Terciaria.

### Teorías orogénicas

Localizado el fenómeno orogénico a lo largo de los geosinclinales, falta conocer ahora el origen de la energía capaz de producir los plegamientos y las hipótesis que a este respecto se han formulado. Las teorías orogénicas pueden reunirse en dos grupos: unas, *fijistas*, basadas en el supuesto de la contracción nuclear; otras, *movilistas*, fundamentadas en la idea de los desplazamientos corticales.

## A. TEORÍAS FIJISTAS

*Teoría de la contracción.* — Descartes, en 1640, inició la teoría de la contracción de la Tierra, que más tarde desarrollaron científicamente diversos geólogos, y que por su seductora sencillez ha sido admitida como verdad inconcusa por espacio de más de un siglo. Se basa esta teoría en la hipótesis de la existencia, en el interior de la Tierra, de un núcleo central flúido e incandescente, el cual, al enfriarse por irradiación, sufriría una pérdida de volumen. La corteza sólida y rígida que lo recubre, incapaz de contraerse, al faltarle el soporte nuclear, se vería obligada por el impulso de su propio peso a arrugarse y a reducir su superficie. La imagen más intuitiva nos la proporciona la manzana cuya piel se encoge y arruga al desecarse y disminuir de volumen la pulpa interior carnosa. La teoría de la contracción, en su acepción original, presupone, pues, una corteza sólida descansando sobre el núcleo central en estado de fusión. Y los únicos hechos sobre los que se apoya, son el aumento de calor con la profundidad, cuya valorización determina el gradiente geotérmico, y la reducción de superficie experimentada por las montañas al plegarse; así, para el Jura, por ejemplo, se admite que su anchura actual es  $1/4$  de la que tendría si sus capas fuesen extendidas horizontalmente, y para los Alpes, la reducción se eleva a  $1/8$ , debiendo cubrir una amplitud de 1.200 kilómetros.

Infinidad de razones de orden geofísico se oponen a la hipótesis de la fluidez nuclear, pues, según quedó consignado al tratar del estado interior de la Tierra, hoy se considera que es rígida como el acero, y que no se enfría ni ha sufrido variación de temperatura desde los tiempos arcaicos de su historia geológica, en que ya existían muy probablemente los glaciares, ya que la pérdida de calor que pudo haber sufrido por irradiación a través de la corteza, es sobradamente compensada por el producido por la desintegración de los cuerpos radioactivos. Por esto se admite que la temperatura de la superficie ha debido de ser constante, por lo menos, por espacio de mil millones de años.

Pero, además de esas consideraciones, hay otras circunstancias de orden geológico que repugnan por igual



a la hipótesis contraccionista, por lo menos en su acepción primitiva. Enumeremos las principales.

1) Es imposible explicar, suponiendo que el Globo es homogéneo, por qué el arrugamiento de la corteza, es decir, la formación de cordilleras, no se efectúa uniformemente en el tiempo y en el espacio. Vemos, por el contrario, que la distribución del relieve continental se verifica sólo en dos direcciones normales, latitudinal la una (plegamientos mediterráneos) y meridiana la otra (plegamientos del Pacífico), que en nada se asemejan al aspecto de una manzana arrugada. Además, según la llamada *ley de la constancia de los continentes y los océanos*, las grandes áreas continentales gozan de una señaladísima tendencia a la emersión, ya que rara vez han sido empujadas a los fondos abisales, y viceversa.

En segundo lugar, la Tierra pasa por cuatro períodos principales de plegamiento separados por otros tantos de descanso de muy desigual duración. La contracción, en cambio, requiere: *a)*, que los esfuerzos orogénicos sean continuados; *b)*, que los plegamientos se sucedan cada vez con mayor frecuencia, ya que, al aumentar su espesor, la corteza sería cada vez más difícilmente plegable; la historia geológica enseña todo lo contrario, pues los intervalos en la formación de las montañas paleozoicas son de 36-40 millones de años; en las mesozoicas, de 13,5-18 millones y en las terciarias de 5,5-6,5 millones.

2) El acortamiento producido en los estratos de algunos sistemas montañosos es tan intenso, que si su causa fuese la contracción, se requeriría, dado el coeficiente de dilatación de las sustancias más difundidas, hierro, níquel, cuarzo y caliza, sólo para el plegamiento terciario, una pérdida de  $2.400^\circ$ . Resultados absolutamente opuestos a los datos de la geofísica moderna.

3) La contracción excluye la posibilidad de tracciones considerables, como las que parecen indicar la desviación de la punta meridional de los continentes, la torsión de las guirnaldas de islas del Este del Asia, masas al parecer separadas por tracción del continente próximo, y a los fenómenos de distensión, como la formación de grandes fosas, y, en general, todos los que deben su origen a estiramientos.

4) La enorme contracción requerida por los grandes plegamientos debería producir formidables transgresio-

nes universales al levantarse el nivel de los océanos, los cuales invadirían los continentes. Las observaciones geológicas no acusan estos fenómenos transgresivos concomitantes con los plegamientos de la Tierra.

Razones geofísicas excluyen, pues, la fluidez nuclear, al propio tiempo que las observaciones geológicas son contrarias a la idea de la contracción terrestre.

*Neocontraccionistas.* — Hans Stille, Jeffreys, F. Nölke y otros autores han desenterrado la teoría de la contracción modificándola para hacerla compatible con los resultados obtenidos actualmente por la geofísica y la geología. Particularmente, el esfuerzo del último de ellos no parece ser un simple prurito innovacionista, sino que presenta la teoría que califica de «cenicienta», engalanada con un ropaje enteramente nuevo que permite descubrir sus encantos. Como dice el culto geólogo traductor de la edición española (1): «Con toda valentía, sin tener para nada en cuenta la crítica procedente de todo aquel que abraza con demasiada prisa cualquier teoría geológica modernista, que a veces no tenga acaso otro prestigio que el de una novedad u originalidad por demás rebuscada, el profesor Nölke abandona de vez en cuando esta senda deslumbradora y vuelve la mirada hacia atrás, ese atrás que acaso retorne periódicamente, como retorna en tantos aspectos de la vida humana; planta sus tiendas en el campo de la clásica teoría de la contracción, que parecía anticuada; con bien templada reja vuelve a labrarlo, y ahondando, ahondando, halla preciados tesoros».

Nölke empieza investigando el estado del interior de la Tierra en relación con su desarrollo ontogénico, prestando particular atención a los estadios anteriores a la fase planetaria, época que, por la falta de documentos fidedignos, bien puede calificarse de tiempos prehistóricos de la Geología.

El Sol y los planetas proceden de una nebulosa cósmica de naturaleza gaseosa, cuya temperatura, como la de los mismos espacios interplanetarios, raya en el cero absoluto, es decir,  $-273^{\circ}$ . Este sería el primer estadio evolutivo. Los componentes de las nebulosas, en virtud de sus atracciones mutuas, tienden a agruparse

---

(1) F. NÖLKE. *Hipótesis geotectónicas*. Trad. de J. CARANDELL, Madrid, 1935.

formando partículas meteóricas pulverulentas separadas por los gases residuales de la propia nebulosa, los cuales, a su vez, frenando con el roce los movimientos de las partículas, contribuyen al espesamiento de la nube pulverulenta, que adquiere cada vez mayor densidad. Así se forma, finalmente, una nube pulverulenta atravesada por masas gaseiformes comprimidas y con un núcleo meteórico fofo que forma el embrión del planeta, sujeto, como éste, a un movimiento de rotación. En virtud de la gravedad, las partículas de los espacios cercanos y las de la misma nube van siendo atraídos y caen violentamente por su propio peso sobre el núcleo, calentando esa lluvia continua de partículas meteóricas, tanto la atmósfera gaseosa que atraviesan, como el suelo sobre el cual van a parar; es la energía gravitatoria que se convierte en calor, de la misma manera que un proyectil de artillería que choca contra una plancha de acero, sin perforarla, la pone incandescente. Por eso, alrededor del núcleo meteórico frío, acaba formándose una atmósfera ardiente. Cuando cesa este singular bombardeo cósmico por haber sido captadas las masas nebulósicas inmediatas, las capas atmosféricas exteriores pierden calor por irradiación y se enfrían rápidamente. Los materiales de la atmósfera se condensan, y se forman nubes cada vez más espesas y compactas que acaban licuándose y constituyendo una envoltura líquida e incandescente alrededor del núcleo meteórico. Parte del calor es comunicado al núcleo, que se reblandece, y otra parte sigue perdiéndose por irradiación, hasta que en la periferia se forma una corteza sólida con una envoltura exterior atmosférica integrada por los cuerpos que a bajas temperaturas se mantienen en estado gaseoso. Así queda constituida la Tierra al terminar la segunda fase de su evolución; es decir, formada por tres zonas: un núcleo metálico recalentado, compacto y homogéneo, una corteza escoriácea solidificada y una envoltura atmosférica ligera. Existe todavía, por lo tanto, una diferencia notable entre ese globo cósmico y la Tierra actual; falta la regular ordenación de los materiales pesados de la endosfera en capas concéntricas de densidad progresiva hacia el interior.

Simultáneamente con estos últimos acontecimientos, tuvo lugar un fenómeno importante: la formación de la Luna. En efecto, la masa pulverulenta condensada a

lo largo del ecuador a causa de la intensidad de la fuerza centrífuga que llega a vencer a la misma gravedad, empezó a describir trayectorias libres, independientes de la rotación terrestre; este anillo ecuatorial acabó siendo la zona matriz de la Luna, la cual vió aumentar su masa con la atracción de las partículas nebulósicas más cercanas. La Luna, que progresivamente se separaba de la órbita terrestre, provocaría al principio, a causa de su proximidad, enormes mareas que cuartearían la película recientemente solidificada, cuyos fragmentos, al hundirse, se fundían de nuevo; pero las heridas cicatrizaban a prisa a medida que aumentaba la pérdida de calor a través de las grietas, hasta llegar el momento en que la corteza, completamente solidificada, fué estable y permanente; las primeras rugosidades de la superficie estaban ya, pues, constituidas al terminar este segundo período evolutivo.

El calor almacenado en el interior, se ve pronto incrementado con la aparición de la radioactividad, que resulta ser particularmente poderosa en las rocas de la corteza. Este aumento de la temperatura es suficientemente intenso para provocar una serie de reacciones químicas y procesos termodinámicos entre los materiales del núcleo y de la corteza; se producen corrientes interiores que facilitan las combinaciones químicas; el hierro se combina con el oxígeno que había quedado ocluido a fuerte presión entre las partículas meteóricas; esta oxidación, y otras combinaciones químicas parecidas, acarrearán constantes pérdidas de volumen; la materia, al contraerse, libera calor de gravitación, que a su vez aviva las reacciones químicas. El conjunto tiende a un estado de equilibrio térmico y químico mediante una redistribución total de sustancias en el interior de la Tierra. La primitiva aglomeración irregular de polvo meteórico es destruida. Las materias pesadas que continuamente se forman se hunden en el núcleo pastoso, mientras las ligeras ganan la periferia; poco a poco, por medio de estas corrientes, de este continuo trasiego y transformación de la materia, de ese *metabolismo terrestre*, al decir de Goldschmidt, comparación feliz de los intercambios de materia del interior con los que ocurren en los organismos vivos, la Tierra va adquiriendo su estructura en capas concéntricas de densidad progresiva hacia el interior.

En consecuencia, el proceso de la contracción es el siguiente: aumento de temperatura, metabolismo químico y disminución de volumen. La contracción terrestre no obedece, por tanto, a la pérdida de calor por irradiación, como admitían los antiguos contraccionistas, sino que *resulta de una reestructuración y reorganización de los materiales del interior*. El fundamento de la teoría de Nölke, radica, pues, en la energía desarrollada por la naturaleza e intensidad de las reacciones químicas y en la pérdida de volumen que resulta de dichas combinaciones nuevas que se agrupan por orden de densidades.

En otro orden de ideas, Stille y el propio Nölke se esfuerzan en reajustar a la vieja idea de la contracción los fenómenos geológicos observados. Así, al contraerse el núcleo, en la costra o piel muerta e inerte de la Tierra se producirían hundimientos, dobleces y fracturas que tendrían por objeto una disminución de superficie en algunas partes de ella; para alcanzar, pues, la costra su nueva posición de equilibrio, se produciría una verdadera lucha por el espacio; las partes duras y gruesas constituyen bloques estables difícilmente deformables, los cuales se conservarían formando bloques continentales, verdaderos topes de prensa entre los que se estrujarían las rocas blandas, plásticas, de los geosinclinales, que al plegarse permitirían a la corteza recuperar el equilibrio perdido. Así se originarían también las presiones laterales que engendran las cordilleras, pudiéndose llegar a desplazamientos horizontales importantes de las masas plegadas, que caerían encima de las regiones estables vecinas. La presión que actuaría lentamente sobre los bloques continentales endurecidos produciría en ellos deformaciones y movimientos según la vertical (epirogénesis), mientras serían insensibles a presiones más energéticas y de corta duración, en cuyo caso se limitarían a propagar el movimiento. Entre orogénesis y epirogénesis no existen, pues, diferencias esenciales; dependen únicamente de la fuerza y duración de la presión y de la distinta capacidad receptiva de las rocas de la corteza.

*La Isostasia.* — A pesar de los esfuerzos de los reformistas, la teoría de la contracción ha ido perdiendo terreno a medida que se desarrollaba una nueva concepción conocida por *Isostasia*, que conviene mucho más

a las circunstancias reveladas por las investigaciones geofísicas sobre el interior de la Tierra.

La Isostasia se basa en las llamadas anomalías de la gravedad. Suponiendo que la Tierra fuera un elipsoide de revolución, con sólo los 21 kilómetros de diferencia entre los radios ecuatorial y solar, la intensidad de la gravedad debería ser uniforme en todo el planeta si su constitución fuese homogénea. Pero la densidad de las rocas de la corteza es de 2,7, y algo superior a 1 la del mar; por lo tanto, los continentes tienen un exceso de masa visible con respecto a los océanos, y en ellos la gravedad debería ser mayor que la media o normal; en los océanos habría de ocurrir todo lo contrario: la gravedad debería ser menor, por ser menos densa el agua del mar. La práctica demuestra que la gravedad es casi igual en todas partes o aun ligeramente superior en los océanos, lo cual quiere decir que el defecto aparente de masa de los mares está compensado interiormente por un exceso de masa invisible, y viceversa, que el exceso de masa visible de los continentes es contrarrestado por un defecto de masa en el interior. Lo que

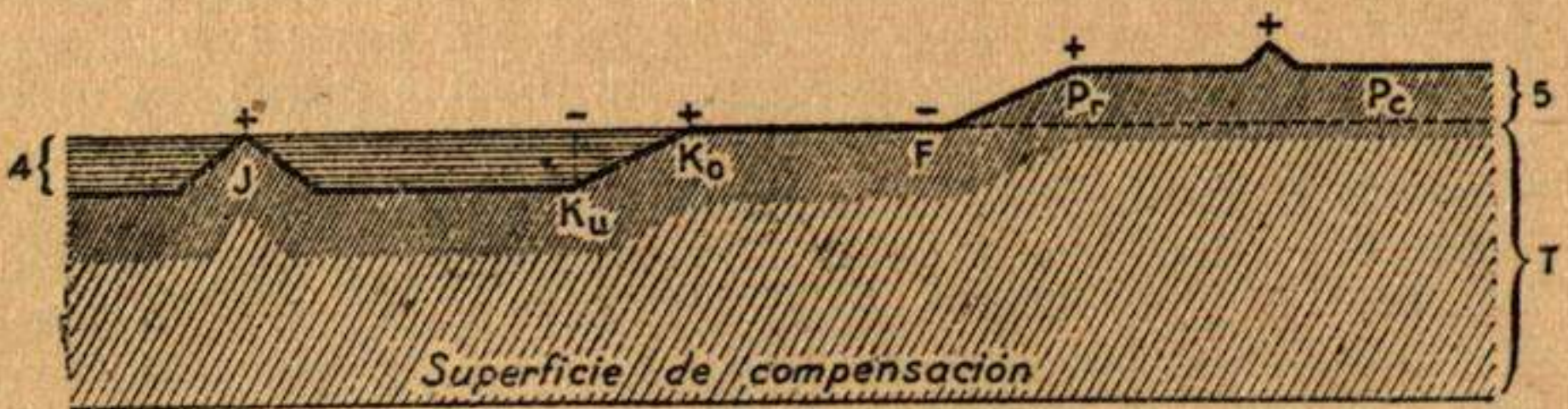


Fig. 16.—Anomalías de la gravedad (Inglada).

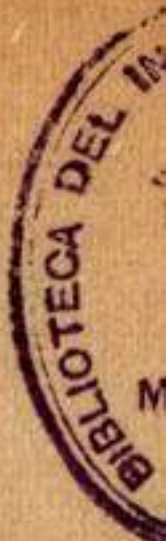
se expresa también en otros términos diciendo que *sobre los continentes existe anomalía negativa* de la gravedad, y *anomalía positiva* en las zonas oceánicas (figura 16).

Para explicar estas anomalías, se admite que las rocas claras que abundan en los continentes, ricas en sílice y aluminio (*Sial*), de las cuales es prototipo el granito, son más ligeras que las rocas oscuras profundas, que nos revelan las erupciones volcánicas, y que formarían el fondo de los mares, constituidas principalmente por sílice, hierro y magnesio (*Sima*), de las cuales el repre-

sentante típico es el basalto. Es preciso admitir todavía que estos bloques ligeros de sial flotan sobre los fondos de sima como las almadrías o grandes témpanos de hielo (*icebergs*) sobre el mar, es decir, con las raíces sumergidas en el sima, ya que únicamente de esta forma se explican los defectos de masa de los continentes. Cuanto mayor sea la altura de la montaña, mayor tendrá que ser la parte de sial hundida en el sima para que perdure el equilibrio, de la misma forma que cuanto mayor es un iceberg, mayor es el volumen de la parte sumergida. Se calcula, teniendo en cuenta las densidades del sial y del sima, que para que un bloque sobresalga unos 4.800 metros (altura aproximada del Montblanc) deben estar sumergidos unos 95 kilómetros de su masa, en números redondos.

Como, por otra parte, las observaciones sobre propagación de los terremotos demuestran que los materiales del interior de la Tierra están dispuestos por densidades progresivas de una manera regular y homogénea, es preciso aceptar que estas diferencias observadas en la corteza tienen lugar solamente hasta cierta profundidad, en donde quedan equilibradas las diferencias de peso entre sial y sima, de forma que cada columna ejerza igual presión sobre las capas profundas de la Tierra, constituyendo aquella región la llamada *superficie de compensación*, a partir de la cual los materiales se disponen hidrostáticamente en capas concéntricas según sus densidades. Por consiguiente, únicamente por encima de la superficie de compensación existen desigualdades en la repartición de los materiales, pues a causa de los salientes del relieve continental no es posible la distribución en capas concéntricas como en el interior; para que subsista el equilibrio, es necesario que todo saliente esté formado por materiales ligeros del sial, mientras las depresiones profundas compensan la pérdida de volumen con materiales pesados del sima. Así se concreta la noción de corteza como zona inestable de la Tierra, de unos 120 kilómetros de espesor, en donde existen anomalías en la distribución de los materiales que la forman (figs. 17 y 18).

Con esta disposición el equilibrio resulta estable mientras no se produzcan en la superficie terrestre perturbaciones que disminuyan o aumenten el peso de algunas dovelas de la corteza; pero como las aguas, y



en general todos los agentes de la erosión, arrancan de continuo materiales de los continentes para depositarlos en los fondos oceánicos, en cantidades que aunque parezcan insignificantes hemos visto que alcanzan anualmente cifras fabulosas (se supone que desde su

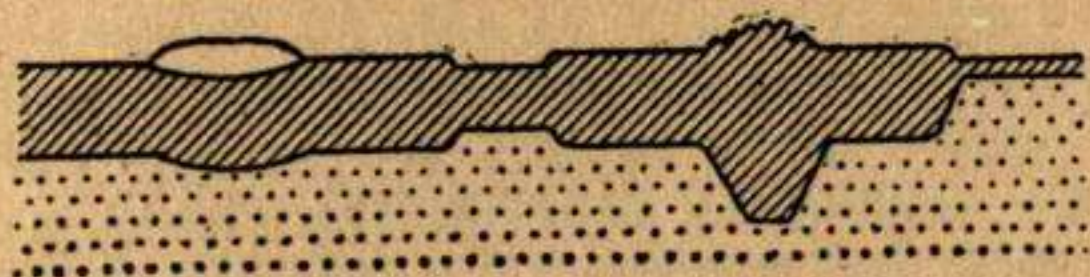


Fig. 17.—Explicación de las anomalías de la gravedad. El defecto de masa en los relieves continentales es contrarrestado por el mayor espesor de los bloques de sial (rayado).

formación en los tiempos terciarios los Alpes han sido rebajados en unos 5.000 metros), los bloques continentales del sial pierden lentamente de peso, mientras los océanos se sobrecargan. Para restablecer el equilibrio es forzoso que los bloques asciendan progresivamente

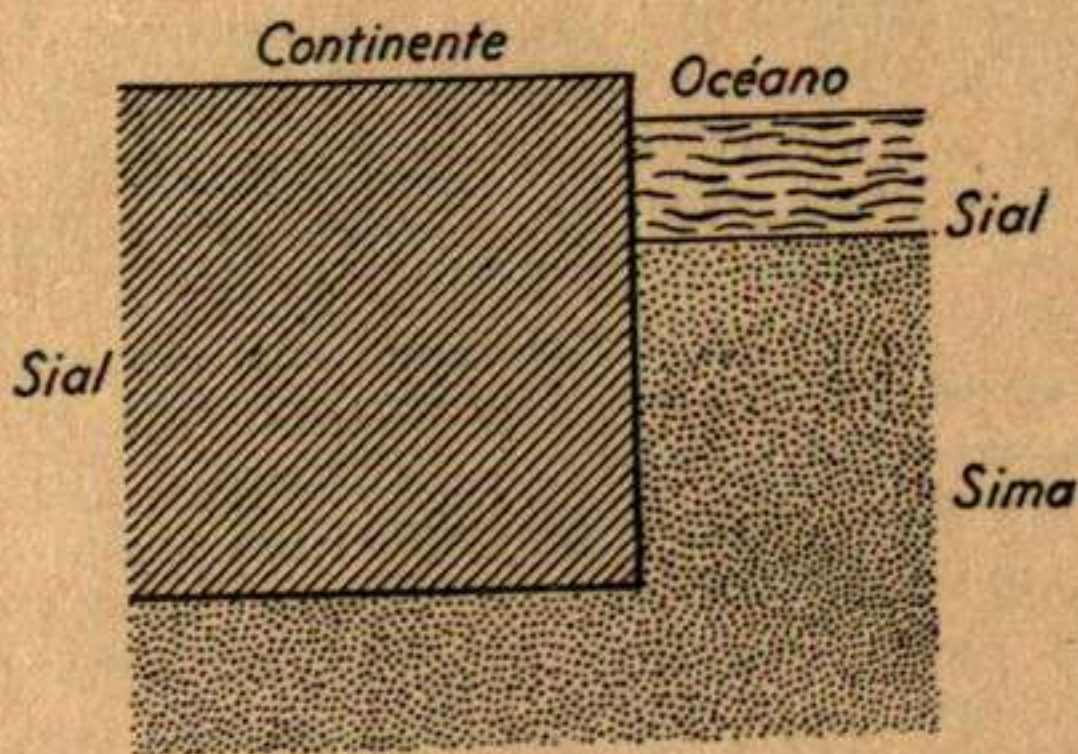


Fig. 18.—Corte esquemático de un continente de sial flotando en el sima.

de forma análoga a cuando se descarga una almadía o un barco, para compensar la pérdida de peso con los materiales pesados del sima que ocuparán el espacio desalojado por el bloque de sial; por la propia razón, las masas acumuladas lentamente sobre el sima del fon-



do de los océanos se irán hundiendo lentamente a medida que aumenta el aporte de nuevos materiales (figura 19).

Las observaciones geológicas sobre movimientos epirogenéticos vienen a corroborar este supuesto. La península de Escandinavia, por ejemplo, al liberarse de la masa de hielos de los tiempos cuaternarios, asciende paulatinamente. De la misma forma, el estudio de la sedimentación en el fondo de los geosinclinales confirma plenamente el descenso gradual de los fondos oceánicos y su paso a zonas sometidas a elevadas temperaturas en donde se forjan las rocas metamórficas.

De acuerdo con las observaciones gravifísicas, el fondo del Pacífico estaría constituido por sima, mientras el Atlántico poseería un puente de sial que uniría el bloque europeo con el americano. Esta distinta composición permite explicar algunas de las diferencias que venimos encontrando entre el Atlántico y el Pacífico.

En virtud de la isostasia, la Tierra tiende, pues, a una figura de equilibrio en la cual estén compensadas las diferencias de densidad de los materiales de la corteza; esta figura, hacia la cual se orienta todo cuerpo planetario en virtud de la gravitación, habría ya sido alcanzada si la acción desequilibradora de los agentes de la erosión no lo hubiese impedido. Esta condición del equilibrio a la cual la Tierra se acerca lentamente en medio de un continuo tejer y destejer, fué llamada por Dutton *Isostasia*. Por eso la isostasia, más que una teoría orogénica, es un hecho geofísico que hoy es admitido universalmente, y el cual deben tener en cuenta las teorías que pretenden explicar la génesis de los continentes y de los océanos.

La isostasia ha servido, no obstante, para aclarar algunos de los fenómenos orogénicos. Así, se atribuye al restablecimiento del equilibrio isostático la fuerza ple-

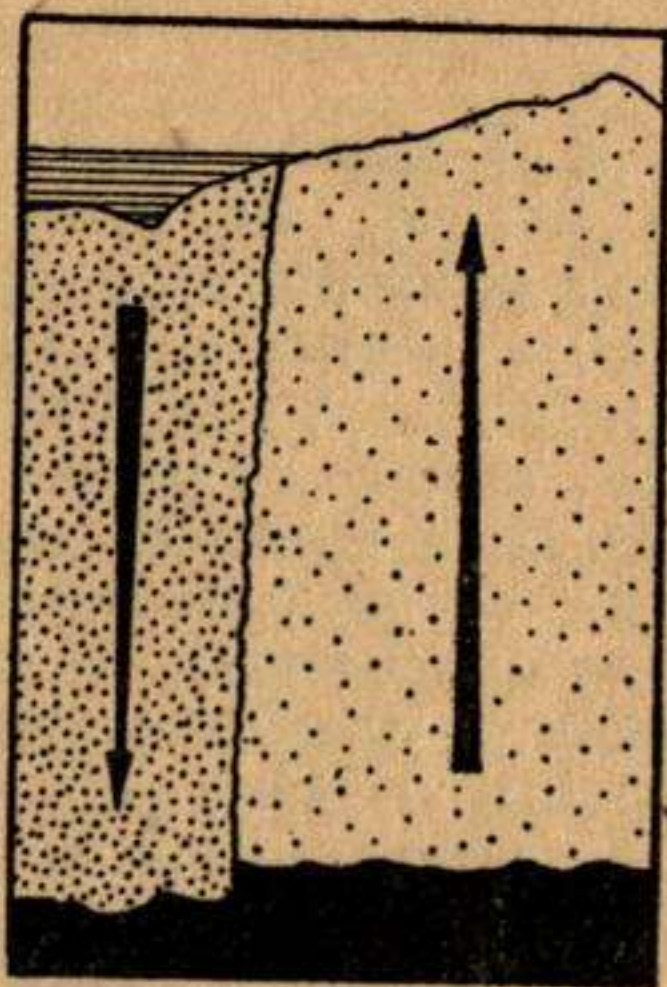


Fig. 19.—Movimiento de compensación isostática, según Sieberg.

gante, que tiende a llevar los materiales de las regiones oceánicas sobrecargadas a los bloques siálicos descargados; por eso las montañas deben formarse sobre los bordes de los continentes (*desplazamiento de los bordes continentales*, de Stille). Pero claro está que el principio isostático no explica la distribución de los relieves en dos zonas normales ni otras muchas particularidades orogénicas.

## B. TEORÍAS MOVILISTAS

Las teorías hasta ahora expuestas se fundan en la existencia de movimientos en sentido vertical y en la permanencia e inmovilidad de los bloques continentales, admitiendo, todo lo más, ligeros desplazamientos producidos por las ondas orogénicas al estrellarse contra macizos resistentes. A esta concepción fijista, base de la teoría de la contracción, se oponen hoy las teorías que admiten grandes desplazamientos o traslaciones de los continentes en sentido horizontal, para explicar no sólo la génesis de las cordilleras, sino también la repartición de tierras y mares, la distribución de climas y las migraciones de los seres que vivieron en pasadas épocas geológicas. Estas teorías se designan con la denominación de *movilistas* o *epiroforéticas*, palabra esta última introducida por Salomón Calvi y que hace juego con la de *epirogénesis*, reservada para los desplazamientos verticales. De estas teorías, la que goza de mayor prestigio es la del geólogo alemán Alfredo Wegener, sabio genial, muerto en 1932 en el curso de una expedición a Groenlandia en busca de nuevos datos con que enriquecer su tesis de las traslaciones continentales.

*Teoría de las traslaciones continentales.*—Se sabe que al finalizar la Era Primaria, grandiosos glaciares, parecidos a los actuales campos de hielo de Groenlandia, se extendían por buena parte de las tierras situadas en el hemisferio Sur: India, Australia, Sudamérica y África. Para explicar el hecho enigmático de encontrar tan extensas glaciaciones en latitudes casi ecuatoriales, se supuso que el eje de rotación de la Tierra habría cambiado de posición y que el polo sur estaría entonces situado en el océano Índico; pero en este supuesto, el polo norte coincidiría con los bosques exuberantes que

en aquella época formaron los yacimientos de carbón en América del Norte y que requieren la existencia de un clima moderadamente cálido. Ante la imposibilidad de explicar por las teorías orogénicas hasta entonces formuladas éste y otros muchos hechos bien estudiados, Wegener planeó su teoría basada en los desplazamientos continentales.

Sigamos al propio geólogo y veamos de qué manera tan sencilla llegó a idear tan genial teoría. «La primera idea sobre las traslaciones continentales se me ocurrió en 1910, al notar en un mapamundi la perfecta coincidencia de las costas atlánticas; pero de momento no le presté atención, por juzgar inverosímiles dichas traslaciones. En otoño de 1911, por un boletín que vino a parar a mis manos casualmente, me enteré de los resultados paleontológicos, ignorados por mí hasta entonces, que prueban la primitiva comunicación terrestre del Brasil con África. Esto me indujo a hacer un examen previo de todos los datos geológicos y paleontológicos que interesaban a la cuestión de las traslaciones continentales, y obtuve en seguida tan importante confirmación que quedé profundamente convencido de la exactitud de la teoría.» En 1915, en plena guerra europea, se publica la primera edición de la obra fundamental de Wegener, que pronto había de atraer la atención del mundo sabio, *La génesis de los continentes y de los océanos*, traducida en 1922 al español por el ilustre geodesta Vicente Inglada.

El punto de partida de la teoría wegeneriana es, pues, la correspondencia del litoral africano y europeo con el de América. «A quien estudie las costas opuestas del Atlántico Sur—dice Wegener—no dejará de llamarle la atención la marcha parecida del litoral en el Brasil y África. No sólo el gran codo octagonal de la costa brasileña en el Cabo de San Roque encuentra su fiel molde negativo en el de la africana del Golfo de Guinea, sino también, al Sur de ambos puntos homólogos, a cada saliente del litoral brasileño corresponde un entrante de igual forma en el litoral africano, y viceversa.» La hipótesis de Wegener no se basa simplemente en la coincidencia de los perfiles litorales atlánticos, sino en las correspondencias que entre las alineaciones montañosas y los terrenos geológicos existen en las dos costas opuestas del Atlántico, por lo cual dice este

autor: «De importancia decisiva me parece el hecho de que, efectuando el acoplamiento de las dos orillas, cuyos contornos son exactamente iguales a uno y otro lado, las formaciones geológicas pueden considerarse como prolongaciones unas de otras; es como si tratáramos de acoplar los fragmentos de un periódico roto y, después de lograr que coincidieran perfectamente los bordes, comprobásemos que a uno y otro lado las líneas del texto impreso también ajustan; hecho esto, no habría más remedio que admitir que éstos formaban el periódico, tal como lo hubiésemos reconstituido».

El fundamento geofísico de la teoría de las traslaciones continentales se apoya en la isostasia; por eso supone Wegener que los continentes formados por los materiales ligeros del sial flotan como témpanos de hielo o almadrías sobre el fondo pesado de sima. En un principio, los bloques de sial se encontraban reunidos en un solo y enorme continente denominado *Pangea*, que más tarde se fragmentó por medio de grandes fracturas, proceso que acaba con la separación definitiva de América del Norte y Europa acaecida en la última mitad de la Era Terciaria. Los bloques resultantes, separados unos de otros, van a la deriva flotando sobre el sima de los fondos oceánicos, en los cuales se hallan sumergidos en gran parte. Este movimiento errático de los bloques continentales viene orientado por dos fuerzas que obran en distinta dirección; la una, la fuerza centrífuga producida por la rotación de la Tierra, que tiende a arrastrar los témpanos continentales hacia el ecuador, en donde aquella fuerza alcanza la máxima intensidad; por eso se dice que los continentes huyen de los polos o que gozan de movimiento *polarífugo*. Según eso, llegará forzosamente un momento en que en las latitudes ecuatoriales chocarán los bloques erráticos procedentes del hemisferio Norte y del hemisferio Sur, comprimiendo entre ellos los materiales depositados en los mares y formando cordilleras arrumbadas paralelamente al ecuador; son los Alpes, Pirineo, Himalaya, y, en general, todas las cordilleras del llamado sistema alpino que forma un arco montañoso continuo. Los hechos observados vienen en apoyo de la hipótesis, pues, efectivamente, el ecuador terciario, según acreditan las facies de los sedimentos plegados, pasaba por el Mediterráneo actual. El otro movimiento se verifica

DISLOCACIONES DE LA CORTEZA

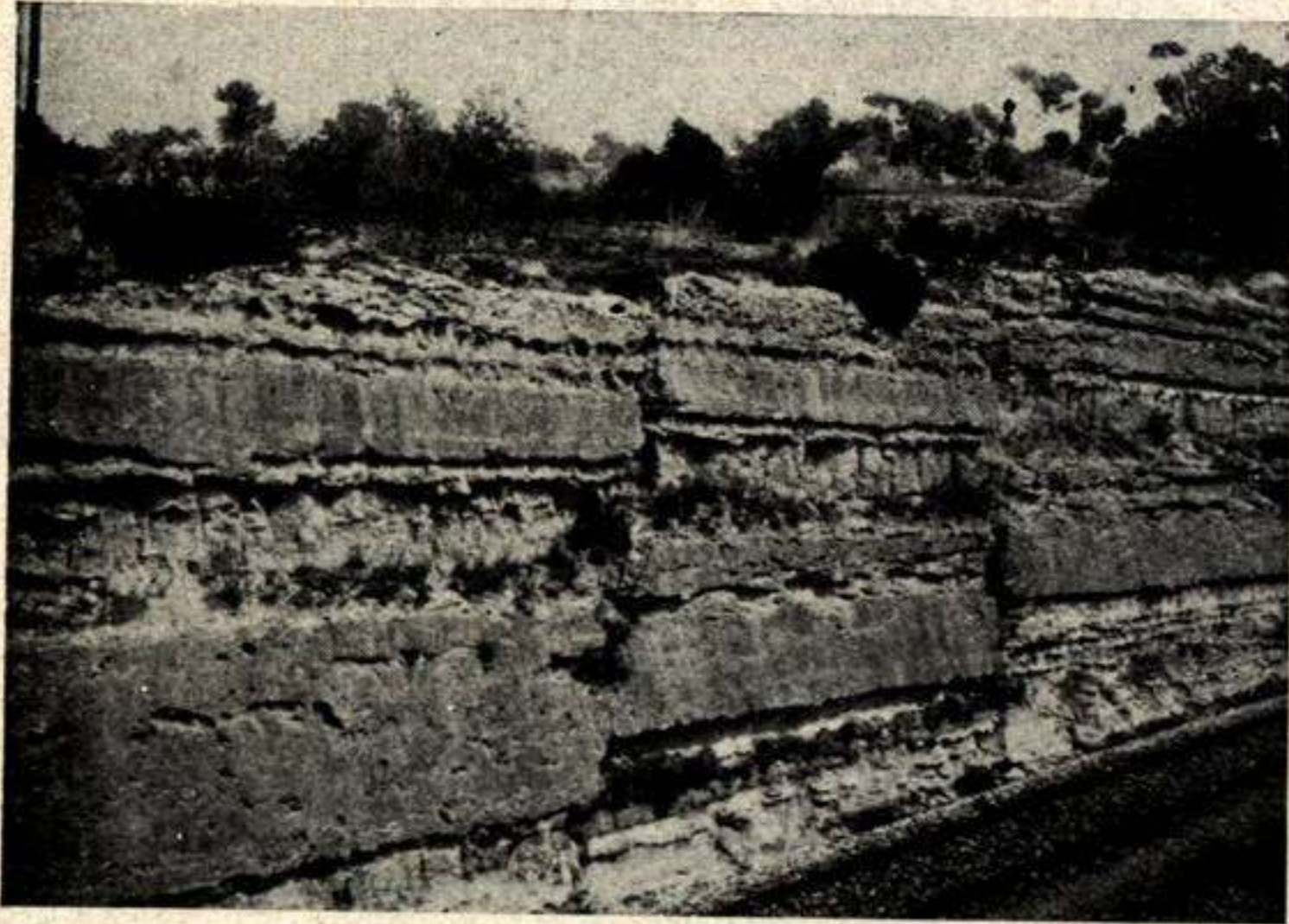


FIG. 1. — Falla doble en el mioceno de Bará (Tarragona).

(Foto. Solé)



FIG. 2. — Falla en el contacto de las calizas triásicas, de tonos claros, y las arcillas rojizas eocénicas, en Aiguafreda (Barcelona).

(Foto. Solé)

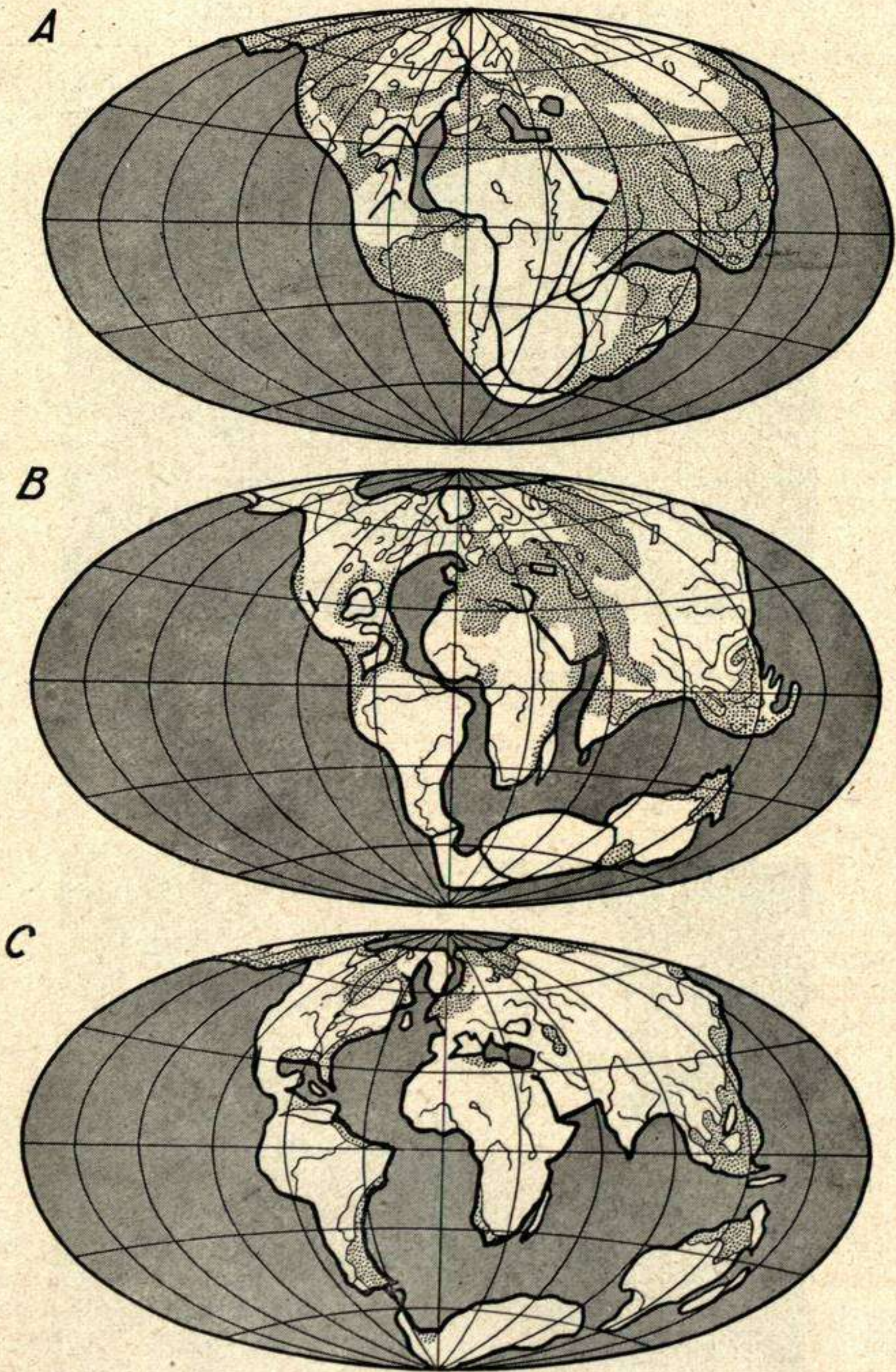


FIG. 20.— Mapa terrestre según la teoría de Wegener. A. Periodo Carbonífero; empieza a dividirse la Pangea paleozoica. B. Periodo Eoceno (terciario inferior). C. Periodo Cuaternario. Las áreas punteadas representan los mares epicontinentales.

en dirección normal al anterior, según los meridianos, y su fuerza determinante es la atracción lunar, la cual determinaría sobre la corteza inflaciones u olas de marea, exactamente parecidas a las mareas oceánicas. Y así como se opone a la formación de éstas su roce sobre el substrátum, en los bloques de sial el frotamiento de marea sería mucho más intenso, por tener que vencer la resistencia del sima espeso. Por esta causa los bloques continentales se retrasan respecto al movimiento rotatorio del resto de la Tierra y giran en consecuencia, aparentemente, en sentido inverso al de rotación, o sea de Este a Oeste (fig. 20).

El fenómeno es parecido al de una rueda mojada que desprende salpicaduras, las cuales van dirigidas en sentido contrario al de rotación por tener que vencer la resistencia del aire. Esta emigración continental hacia Occidente es la que determina el otro sistema de plegamientos terrestres en dirección meridiana (Andes, Montañas Rocosas, Sierra Madre, etc.). En efecto, el frente ponentino de los bloques de sial, en su marcha hacia Occidente, comprime el sima que tiene delante y que se opone a su avance, provocando esta resistencia la formación de un reborde montañoso a consecuencia de la presión sufrida en la fachada frontal, a la manera que la proa de una embarcación levanta olas espumeantes. Por esto los plegamientos americanos aparecen en la costa del Pacífico, que es la dirección de desplazamiento de América. Según Wegener, esta traslación americana sería aún efectiva y se supone que alcanza actualmente en Groenlandia unos 30 metros por año.

Infinidad de razonamientos abogan en pro de la teoría de las traslaciones continentales. Su exposición podría llenar páginas enteras; bastará con esbozar los más importantes. En el orden geológico cabe consignar la coincidencia entre los terrenos geológicos y los plegamientos de las costas atlánticas opuestas; así, los macizos paleozoicos españoles (Meseta Central, Galicia, etc.) encontrarían su pareja en las montañas también paleozoicas de los Apalaches. Esta prueba es también aplicable a las costas de la India, África, Australia y Antártida. En el orden paleontológico, las pruebas no son menos favorables. Antiguamente, los geólogos, ante la igualdad o semejanza de faunas en continentes muy alejados entre sí, habían tenido que recurrir a la hipótesis

de los *puentes continentales*, admitiendo conexiones entre aquéllos a través de estrechas bandas de tierra que hubiesen permitido las migraciones faunísticas. De otra forma no era posible encontrar una explicación satisfactoria al hecho de que las lombrices de tierra actuales, por ejemplo, se encuentren desde España al Japón y en América del Norte. O el de los caracoles de huerta, de los cuales existen las mismas especies en el Sur de Alemania, Inglaterra, Islandia, Groenlandia y América del Norte. Algo parecido ocurre con las percas y otros peces de agua dulce. De la misma manera la flora fósil de América del Sur y África exige también comunicaciones transoceánicas. Todavía resulta más convincente la solución dada al problema de la fauna australiana, la cual presenta estrechas afinidades con la de América del Sur, que actualmente dista unos 900 kilómetros de aquel continente, y en cambio es completamente distinta de la fauna de las islas de la Sonda, situadas a escasa distancia de Australia. «Nadie podría desconocer — dice Wegener — que nuestra teoría, al reducir a tan pequeño trecho la distancia entre América del Sur y Australia, a la vez que crea entre este continente y las islas de la Sonda una gran fosa, da una verdadera solución a la fauna australiana.»

En el orden paleoclimatológico, las pruebas son todavía más concluyentes. En el Spitzberg, por ejemplo, bajo el rigor de un clima polar, se encuentran restos fosilizados de bosques de pinos, tilos, robles, nogales, plátanos y magnolias, lo cual permite suponer que en aquella época el clima de Spitzberg sería muy parecido al del Mediodía de Francia, y su temperatura media sería 20° más elevada que la actual. En otros lugares, por el contrario, se encuentran vestigios de glaciares en regiones actualmente sometidas a un clima tropical; durante la Era Primaria, el centro de Europa disfrutó de un clima templado que permitió la formación de la fronda que posteriormente originó los depósitos hulle-ros de Inglaterra, España, Alemania, etc.

Ante la imposibilidad de explicar estos hechos a veces simultáneos por variaciones de conjunto del clima de la Tierra, como hacían los antiguos geólogos, Wegener ha recurrido a la hipótesis de las traslaciones continentales. Es más, ha reconstituido el trazado del ecuador y la posición de los polos para los distintos



períodos geológicos, encontrando así razonadas explicaciones a hechos antes tan confusos. Además, la posición de los polos con respecto a los continentes no ha variado exclusivamente de una manera relativa a causa de las migraciones continentales, sino también de una manera absoluta, pues al variar la posición de tierras y mares queda alterado el equilibrio terrestre, por lo que el eje de rotación de la Tierra, y por consiguiente sus extremos, los polos, se desplazan a una nueva posición en consonancia con la distribución que las masas acababan de adquirir.

*Objeciones a la teoría de Wegener.* — La solidez de los argumentos expuestos por Wegener, la facilidad con que resuelve arduos problemas geológicos hasta él totalmente insolubles, la entereza y entusiasmo a la vez que el genio indiscutible de su autor, muerto por su ideal, de hambre y frío, entre los hielos groenlandicos, han sido, sin duda, la causa de las sólidas posiciones conquistadas por la concepción wegeneriana. En cuatro ediciones consecutivas de su obra ha ido refutando las objeciones expuestas en la nube de publicaciones y controversias que su libro provocó.

Sin embargo, no es posible desconocer las serias objeciones formuladas por muchos geólogos y geofísicos. Las más importantes pueden reducirse a las siguientes: ¿Por qué América, que se desplaza hacia Occidente, está plegada en sus costas occidentales y en cambio no lo están las costas atlánticas de Europa y África que sufren idéntica traslación? Para encajar las costas de Europa y África con las de América no es suficiente hacerlas sufrir un desplazamiento, es necesario además estirar unos 3.000 kilómetros las de América del Norte y 2.000 kilómetros las de América del Sur, es decir, un 30 y 40 por 100, respectivamente, de la longitud total; el ajuste es, pues, más aparente que real. Por otra parte, las investigaciones geológicas más recientes no encuentran la pretendida analogía de terrenos entre las costas atlánticas de América y las de Europa y África. Otros muchos razonamientos de orden geofísico se han aducido en contra de las consideraciones de Wegener, y sin embargo es preciso confesar que el espíritu se resiste a desvalorizar totalmente la hipótesis de las traslaciones epíricas. La teoría de Wegener resuelve hoy

los problemas geológicos con la misma seductora sencillez que, un día no lejano, lo hizo la hipótesis de la contracción.

#### OTRAS TEORÍAS BASADAS EN LA ROTACIÓN DE LA TIERRA

Siguiendo la idea madre de Wegener, y aun antes de éste, diversos autores han intentado buscar en el movimiento de rotación del Globo la causa determinante de los relieves de la corteza. Son varias las hipótesis que se han formulado partiendo de esta base, las cuales, si bien es preciso convenir en que no han obtenido una acogida demasiado feliz, han influido en cambio poderosamente en la gestación de otras teorías más complejas y mejor estructuradas, como la propia de Wegener.

Unos, como Darwin y Pickering, piensan que el océano Pacífico es la gigantesca cicatriz dejada por la Luna al desprenderse del tronco materno terrestre; la misma fuerza centrífuga o la atracción solar habrían hecho inestables las ondulaciones de mareas y provocado la escisión del satélite de la Tierra. El vacío que se produjo atraería los bloques continentales y determinaría su desplazamiento, y, en último término, los materiales comprimidos formarían los pliegues montañosos.

Otros, como Böhm, suponen que el movimiento de rotación de la Tierra sufre un lento y continuo retraso a causa de la atracción lunar y del roce consiguiente que se produce entre las envolturas de distinta coherencia. Debido a esta retardación, la Tierra será cada vez menos aplastada y más próxima a la forma esférica. Pero la corteza rígida y el núcleo plástico no tardarán el mismo tiempo en adquirir la nueva configuración; estas diferencias entre la forma del soporte nuclear y su cobertera determinarían tensiones capaces de provocar las orogénesis (*Teoría del retardo rotatorio*).

Tomando en consideración esta diferencia en la constitución del núcleo y de la corteza, Kreichgrauer, en su *Teoría de los desplazamientos corticales*, opina que el roce con el núcleo interno retrasaría la velocidad de rotación de la corteza. Teniendo ahora en cuenta que el eje de rotación de la Tierra no es absolutamente invariable, sino que describe un círculo polar en un período de 26.000 años, resulta que la posición del polo

y del ecuador en la corteza no coincidirían exactamente con los polos y el ecuador del núcleo, que se adaptaría más de prisa al movimiento traslatorio del eje terrestre. Estas variaciones producirían fatalmente tracciones y presiones en la corteza al acercarse o separarse de las regiones ecuatoriales, que son las más dilatadas, un sector de aquélla.

### OTRAS TEORÍAS OROGÉNICAS

Acabamos de exponer ampliamente las dos teorías que gozan de más prestigio y que mejor explican los hechos geotectónicos observados: la de la contracción, que hace radicar los esfuerzos orogénicos en el interior de la Tierra, y la de las traslaciones continentales, que, basándose en la isostasia, atribuye a un origen externo a la misma la causa de la orogénesis.

Otros autores, en cambio, suponen que deben buscarse las actividades vitales terrestres en la corteza misma (*Hipótesis térmica y plutónica*) o en las corrientes que se originan debajo de la corteza (*Hipótesis de Holmes y de la undación*).

*Teoría de las corrientes subcorticales.*—La forma sencilla y seductora con que las traslaciones continentales defendidas por Wegener han resuelto un sinnúmero de problemas geológicos de difícil solución, ha sido la causa de que fueran aceptadas por la mayoría de geólogos y geofísicos; únicamente se aprecian diferencias notables en la interpretación de las causas que puedan provocar tales desplazamientos de los bloques de sial. Para Wegener, las causas determinantes son la fuerza centrífuga rotatoria y la atracción lunar, es decir, son de origen cósmico. En cambio, para buen número de autores, las causas de las traslaciones radican en *corrientes que se producen debajo de la corteza*, las cuales tendrían fuerza suficiente para arrastrar consigo los bloques continentales, exactamente igual como las corrientes marinas arrastran los témpanos de hielo flotantes en los mares glaciales. Los resultados aparentes son, pues, los mismos que admite Wegener; la diferencia estriba en el origen atribuido a la fuerza determinante de las traslaciones continentales. Sin embargo, siendo distintas las causas, la orientación del movimiento en los bloques

que viajan a la deriva será también diferente. Para Wegener, sólo hay desplazamiento en dos direcciones, una que va del polo al ecuador y otra de Oriente a Occidente; para los autores que se basan en las corrientes subcorticales, los rumbos que siguen los bloques de sial dependen de las direcciones que toman dichas corrientes, las cuales obedecen a otras causas que no son de origen cósmico sino intratelúrico. Pero aquí empiezan las divergencias; para unos, las diferencias de temperatura existentes entre zonas diversas del interior provocan corrientes de convección dirigidas de las regiones frías a las recalentadas, y viceversa, las cuales tienden a igualar estas diferencias (*Teoría de la convección o de Holmes*); para otros, el origen de tales corrientes debe buscarse en la fuerza de rotación terrestre, que produce corrientes del ecuador al polo y del polo al ecuador parecidas a los círculos descritos por los vientos alisios o por la corriente del *Gulf Stream* (*Teoría de Staub*). Para algunos, las corrientes magmáticas subcorticales se producen a causa de reacciones químicas que provocan aumentos de volumen y, por tanto, una variación del equilibrio isostático, el cual tiene que ser restablecido por corrientes que se dirigen de la región sobrecargada hacia las que han sufrido la pérdida de peso (*Teoría térmica de André*). Estos procesos químicos pueden producir también corrientes magmáticas de diferenciación de los materiales sin necesidad de recurrir a aumentos de volumen (*Teoría de la undación*).

Según Van Bemelen, autor de esta teoría, el magma cortical no se presenta diferenciado en sial ligero y sial pesado, sino que está mezclado formando el *salsima*. A medida que este magma cristaliza, los cristales pesados se reúnen en el fondo para constituir el sima, mientras los ligeros se acumulan en la periferia para formar los bloques de sial que flotan en el *salsima* más pesado (fig. 21); es decir, el magma se ha diferenciado. En virtud de la erosión que descarga los bloques de sial, y con objeto de restablecer el equilibrio isostático, éstos poseen tendencia a la emersión, mientras que la sedimentación oceánica provoca el hundimiento lento del fondo del geosinclinal (fig. 21, I). En estas condiciones, el *salsima* se encuentra comprimido entre el sial de la periferia y el sima del fondo, hasta que, con objeto de restablecer el equilibrio hidrostá-

tico, se yergue en el centro del geosinclinal un geotumor que será el embrión de la futura cadena de montañas. En virtud de este juego de corrientes magmáticas provocadas por los procesos de diferenciación del magma acierta a explicar Van Bemelen la formación de la estructura de los plegamientos alpinos (fig. 21, II y III).

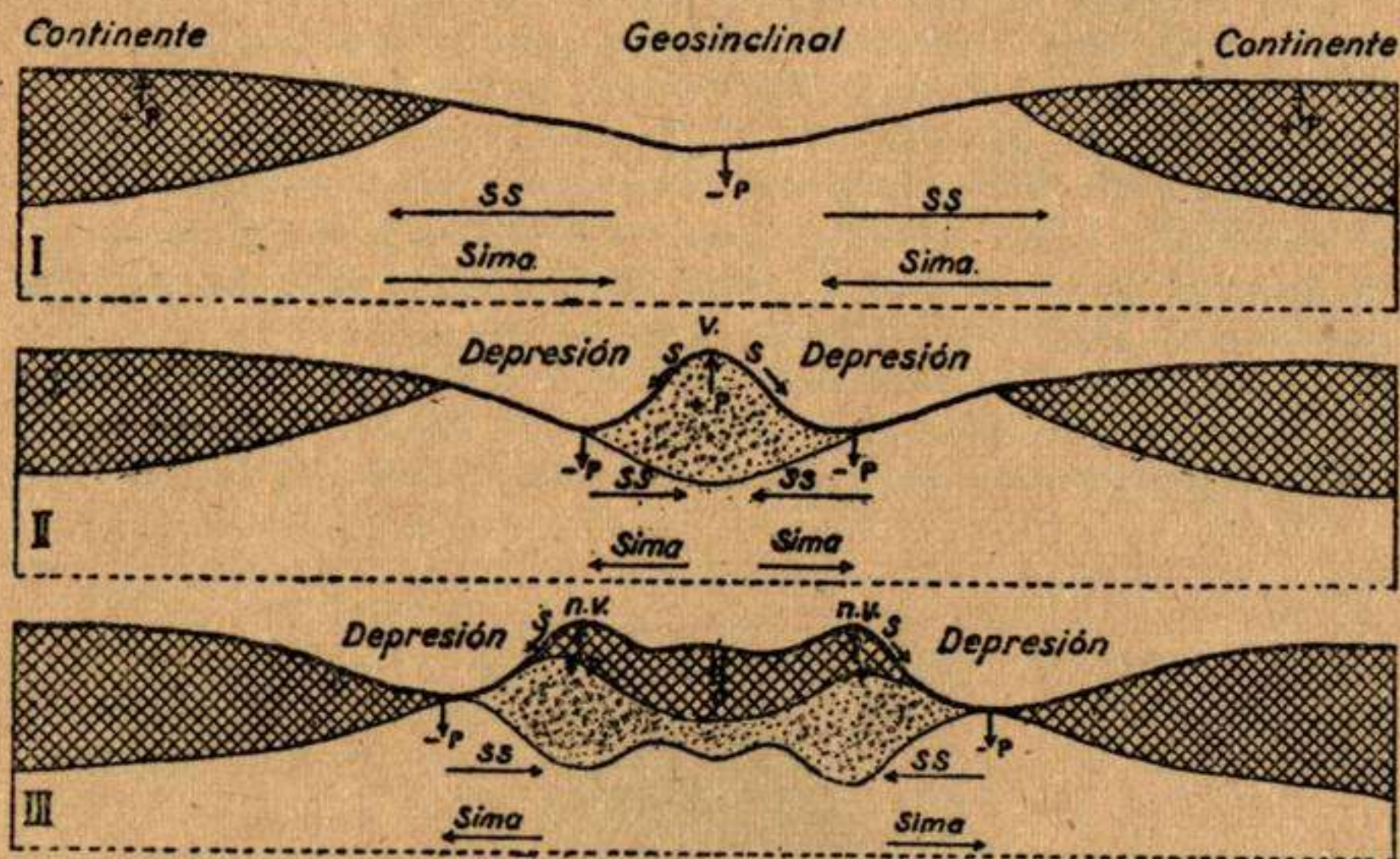


Fig. 21.—Formación de una cordillera según la teoría de la undación (Van Bemelen).

- I. Diferenciación del salsima (*ss*).
- II. Formación de un geotumor en el geosinclinal.
- III. Desdoblamiento del geotumor en dos cordilleras alpinas.

Las flechas indican la dirección de las corrientes magmáticas.

De esas teorías, la mejor explanada y que mejor recoge los diversos factores que son capaces de originar y orientar las pretendidas corrientes magmáticas que se producen debajo de la corteza es la de Holmes, llamada también *Teoría de la convección*.

Holmes admite que la Tierra se ha enfriado por irradiación; pero el calor producido por las sustancias radioactivas que tanto abundan en la corteza ha impedido la cristalización y consolidación de la zona subcortical situada entre la corteza y el núcleo, la cual resulta ser plástica, viscosa y está afectada por corrientes

de convección que tienden a hacer desaparecer las diferencias térmicas que pueden producirse; el estado de esta zona intermedia entre el núcleo metálico y la corteza sólida es parecido al del vidrio recalentado que empieza a fundirse, en el cual también se producen este género de corrientes dirigidas de las regiones frías a las calientes, y viceversa.

Las causas determinantes de las desigualdades térmicas, y por tanto orientadoras de las susodichas corrientes, son de dos clases. Las unas, generales o cósmicas, engendradoras de *corrientes planetarias*, a causa de que, en virtud de la rotación terrestre, en el abultamiento ecuatorial existe mayor masa viscosa y, por consiguiente, mayor proporción de elementos radioactivos que en los polos. Debido al exceso de calor ecuatorial se origina un circuito dirigido de los polos al ecuador y del ecuador a los polos, que tiende a hacer desaparecer estas diferencias térmicas (fig. 22). Así, pues, debajo

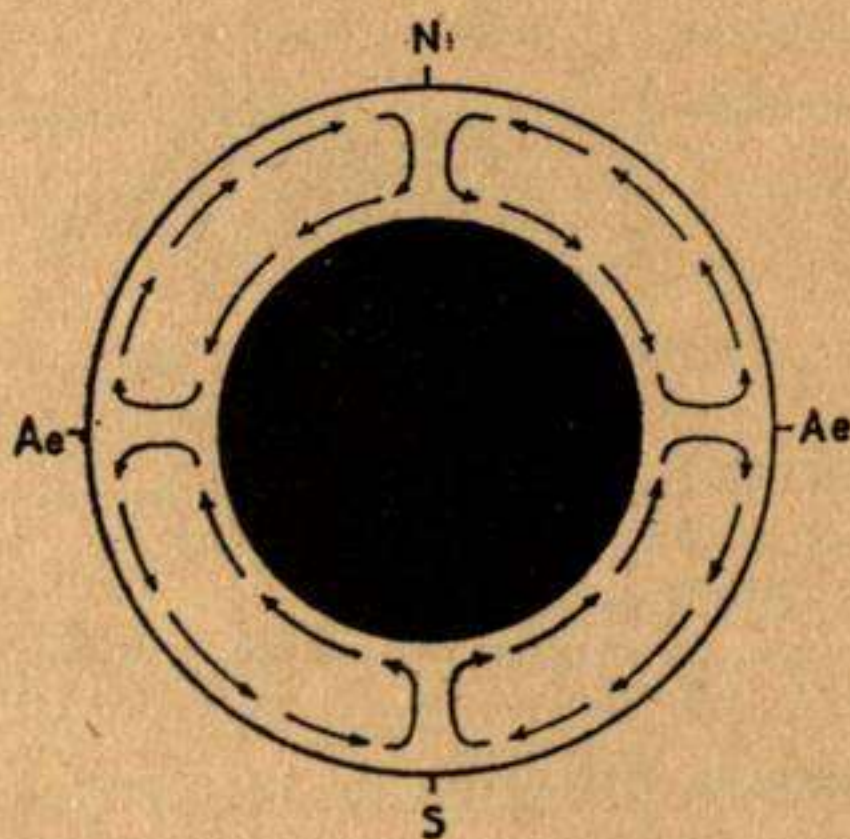


Fig. 22.—Corrientes planetarias según la teoría de la convección.

de la corteza, se produciría una circulación de recorrido análogo al que los vientos alisios y contraalisios describen en la atmósfera y al que las aguas describen en el mar entre las regiones frías y las ecuatoriales cálidas. La corriente ecuatorial ascendente se desliza por debajo de los continentes, y en su marcha hacia los polos arrastra consigo los bloques situados en las lati-

tudes ecuatoriales. La traslación se verifica, pues, en dirección exactamente opuesta a la admitida por Wegener; el movimiento es *polarípeto*, es decir, hacia el polo.

La otra suerte de corrientes son las llamadas *subcontinentales*, las cuales nacen de las diferencias de calor existentes entre el sial y el sima, ya que la cantidad de substancias radioactivas es mayor en las rocas siálicas que en las simáticas; por consiguiente, las corrientes subcontinentales restablecedoras del equilibrio térmico se dirigirán radialmente del continente recalentado o bloque de sial al océano, cuyo fondo está formado por el sima frío. Examinemos ahora los efectos producidos por estas corrientes locales.

En la cara inferior de un bloque de sial, que puede considerarse como *continente ideal* que nos sirve de punto de partida, se origina una corriente que tiene por objeto llevar el magma recalentado por el contacto con el bloque siálico hacia el océano (*A*, en la fig. 23-I), en donde se enfría otra vez (*B* y *C*, en la fig. 23-I); como la causa productora de esta corriente persiste, se producen dos circuitos que giran en sentido contrario debajo de cada tabla continental. Estas fuerzas dirigidas en sentido opuesto acaban rajando el bloque de sial en dos partes iguales, entre las cuales se abre un nuevo océano (fig. 23-II). Al ser arrastrado el bloque, la proa o parte frontal choca contra el sima, produciéndose fenómenos térmicos y reacciones físicoquímicas en la parte delantera de cada tabla de sial, los cuales provocan un abultamiento o reborde montañoso (*B*, en la fig. 23-II). La tabla continental que prolonga este abultamiento delantero no permanece inconvencible; en efecto, la corriente descendente corroe la base del bloque de sial y arrastra y disuelve estos materiales ligeros, que en parte son substituídos por el sima pesado, con lo cual se altera el equilibrio isostático y empieza a hundirse lentamente el centro de la tabla, particularmente debajo del codo que dibuja la corriente descendente, y en donde, por tanto, tiene lugar la desaparición de los materiales siálicos ligeros; como éstos son substituídos por materiales pesados subcorticales, se producirá en virtud de la isostasia una señalada tendencia al hundimiento, es decir, se originará un sinclinal; el aporte de materiales sedimentarios, al sobrecargar el fondo,



facilitará todavía más el hundimiento de esta zona intracontinental. Pero, al propio tiempo, los materiales que se depositan en el reciente geosinclinal se encontrarán pronto sometidos a enérgicas presiones por parte del fragmento de continente situado a retaguardia del movimiento; pues, como éste tiene que vencer menor resistencia que el bloque frontal, avan-

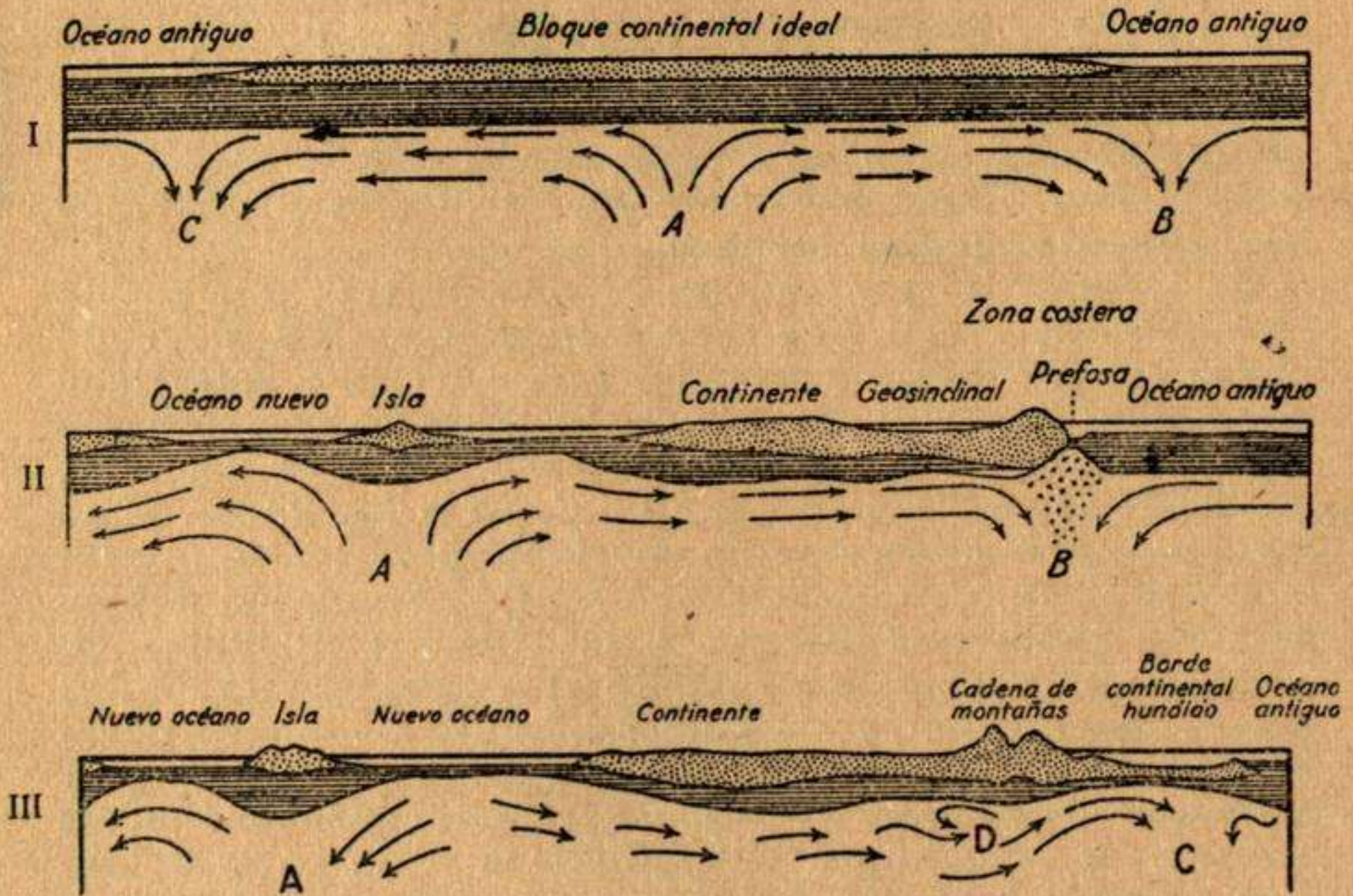


Fig. 23.—Corrientes de convección infracorticales.

zará más de prisa y el geosinclinal quedará comprimido entre ambos; así, del fondo del geosinclinal surgirá una cordillera. A la vez, el nuevo océano que se había formado en el centro del primitivo bloque de sial se habrá ya enfriado lo suficiente para invertir el sentido de las corrientes (A, fig. 23-III), las cuales, al volver a la dirección primitiva, tenderán a reunir de nuevo los continentes que al principio fueron separados por la propia corriente.

El origen del relieve terrestre se explica por el juego combinado de las corrientes planetarias y de las subcontinentales, tal como indica la figura 24. Los dos blo-



ques originarios serían los de Gondwana en el hemisferio Sur y el de Laurasia en el hemisferio Norte, separados por el mar de Tetis. Debajo de estos bloques se originan sendas corrientes subcontinentales que son reforzadas cuando caminan en el mismo sentido que las planetarias, o son disminuídas si lo hacen en sentido contrario, pero teniendo en cuenta que las primeras poseen mayor intensidad que estas últimas. Las corrientes ascendentes subcontinentales se originarían en el

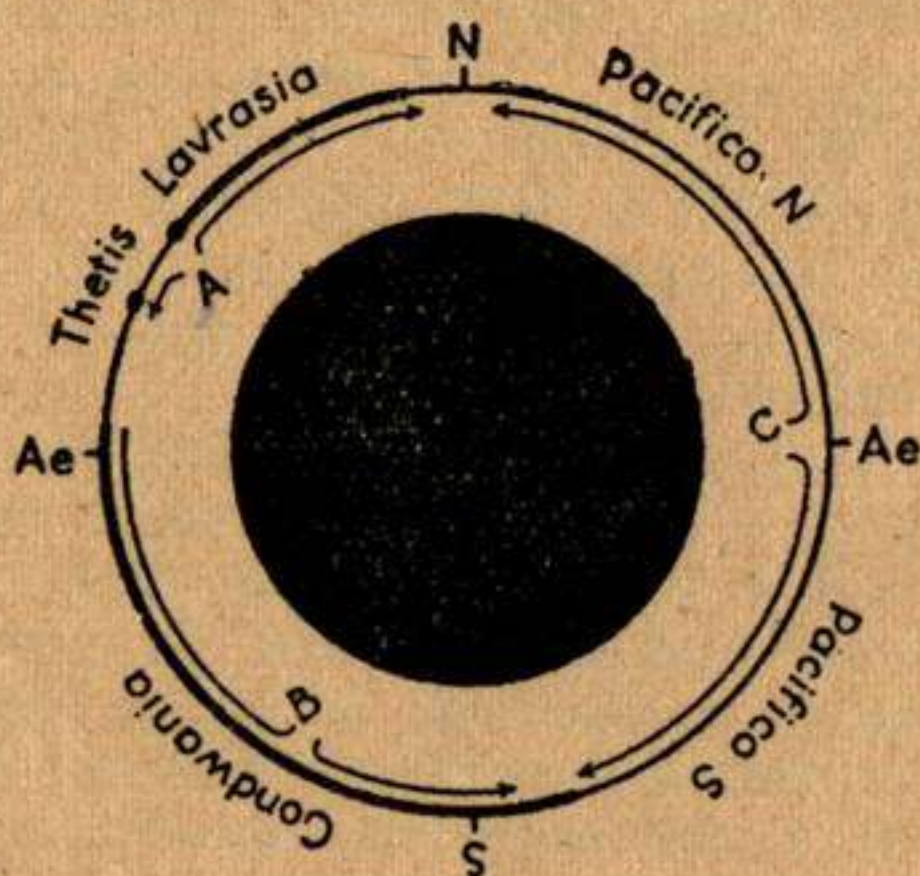


Fig. 24.—Interferencia entre corrientes de convección y corrientes planetarias.

continente de Gondwana un poco al Sur del centro de la tabla continental (en B, fig. 24), y en Eurasia, debajo de las montañas más antiguas (Hercínico-Apalaches). Dada su situación con respecto al ecuador y, por tanto, a las corrientes planetarias que de él parten, una de las ramas ascendentes de las corrientes subcontinentales, la septentrional, sería reforzada, mientras, en cambio, reduciría su potencia la meridional; de esto se infiere que el continente entero se desplazaría hacia el Norte, aunque empezando a desgajarse en el punto de divergencia de ambas corrientes. Para el continente de Gondwana, la combinación de corrientes planetarias y subcontinentales determinaría también una aproximación hacia el Norte, y, por tanto, un acercamiento a Laurasia; el estrechamiento del geosinclinal intermedio en-

tre Laurasia y Gondwana determinaría finalmente la formación de arcos montañosos (plegamiento alpino). De esta suerte, por el juego combinado de unas y otras corrientes, acierta a explicar Holmes la formación del relieve actual.

### El enigma orogénico

El espíritu quédase perplejo ante la enmarañada urdimbre del sinnúmero de teorías orogénicas tejidas y destejidas continuamente por geólogos y geofísicos. En pocos campos de la Ciencia, como en éste, son más dispares los criterios y más opuestas las conclusiones; y, sin embargo, es preciso confesar que casi todas las teorías presentan en su favor una red de observaciones sólidamente trabada.

Pero es que el problema orogénico es de una tal envergadura, y se nos presenta planteado con tan escasos datos, que resulta casi insoluble, por lo menos por ahora. A base de unos pocos hechos observados en la periferia de nuestro planeta, se pretende descifrar las complejas actividades actuales y aun las pasadas de un mundo interior completamente desconocido. Disponemos casi de los mismos elementos de juicio de quien, sin haber visto ni oído hablar nunca del ferrocarril, y sólo con la observación externa de una locomotora, esto es, del movimiento de sus ruedas, del calor que desprenden sus paredes, de los gases y vapor de agua que se escapan por sus aberturas, pretendiera averiguar la estructura de la maquinaria interior, la naturaleza del combustible, la energía que la mueve y las circunstancias de su construcción. De la misma forma que, sin el auxilio del escalpelo, jamás hubiese descubierto el anatómico la complicada estructura de nuestro organismo.

Y, no obstante, a pesar de tan insuperables dificultades, se avanza lentamente por la senda de la verdad; la meta, aunque lejana, se perfila cada vez con contornos mejor definidos. Las teorías que se formulan no tienen que interpretarse como definitivas; son simplemente nuevas aportaciones, nuevas piedras de sillería por colocar en el costoso edificio de la orogenia; a veces, casi no son más que simples andamiajes. Pero, por escaso valor que tenga cada teoría, aporta un nuevo elemento de juicio que aunar a los anteriores: la noción de geo-

sinclinal sirvió para precisar el emplazamiento de los fenómenos orogénicos; la isostasia, para explicar el mecanismo regulador de los movimientos, especialmente de los verticales; la teoría de las traslaciones tiene por lo menos, como aportación definitiva, haber resuelto importantes problemas paleogeográficos, a la vez que introduce en el edificio tectónico nuevas posibilidades; la hipótesis de las corrientes subcorticales encauza el mecanismo de las traslaciones; la teoría de la contracción, convenientemente modificada, apunta al conjunto del fenómeno...

Quizá no esté lejano el día en que podamos colocar la clave que cierre el magno edificio de la concepción orogénica.

## CAPÍTULO VI

### VOLCANES

El proceso de los fenómenos geológicos, en general, por su lentitud y extraordinaria duración, no puede ser abarcado intuitivamente por el hombre, en toda su amplitud y desarrollo, puesto que no alcanza para ello suficiente longevidad. Por eso, sin duda, no impresionaron fuertemente a la Humanidad como si hubiera podido percibirlos desde el principio hasta el fin. Pero los fenómenos volcánicos y sísmicos, por su celeridad y casi momentánea eclosión, permiten que la inteligencia pueda apreciarlos en su conjunto y en la integridad de sus efectos, y de ahí la profunda conmoción producida por las convulsiones espasmódicas de la Naturaleza. Así se explica que entre los mitos y leyendas de todos los pueblos, se destaquen vigorosamente los que tienen sus raíces en el terrorífico volcanismo, como en el mito plutoniano de los griegos, o en la pavorosa concepción del terremoto, como en la leyenda germánica del Walhalla, artísticamente sublimada en la tetralogía wagneriana.

Esa intensa perturbación anímica es la que trasciende en las soberbias páginas de Plinio el Joven al describir en sus dos Cartas a Tácito el fenómeno eruptivo del Vesubio, ocurrido en 24 de agosto del año 79 de nuestra era, que destruyó las ciudades de Estabia, Herculano y Pompeya y en el cual encontró la muerte su tío Plinio el Viejo.

Dice el escritor latino que: «... se levantaba una nube cuya semejanza y forma afectaban más bien la figura de un pino que la de otro árbol. Pues se proyectaba en el aire como un tronco altísimo que al final se expandía en frondosas ramas... Tan presto era blanca como de un color sucio y con manchas, según fuese tierra o ceniza lo que llevaba en su seno».

Plinio el Viejo, al mando de la escuadra, dispone la partida de su hueste para prestar el auxilio solicitado por los que residían al pie de la montaña en erupción. Conforme avanzaban «... la ceniza caía en las naves, más caliente y más densa a medida que se acercaban a la costa. Ya caían cantos y hasta piedras ennegrecidas, calcinadas y hasta trituradas por el fuego; ya la mar se abría en súbito vado, y los escombros obstruían la playa. Entre tanto, en la montaña del Vesubio, relucían por todas partes vastas llamaradas y elevadísimas columnas de fuego, cuyo fulgor y claridad destacaban en las tinieblas de la noche».

Plinio el Viejo, por fin, logra desembarcar en Estabia, pero las cenizas llenan ya las calles y patios, y en la imposibilidad de volver a las naves «removidas por frecuentes y amplias sacudidas...» decide pasar la noche al raso, en la playa, donde la masa de gases sulfurosos le cortó la respiración.

En otro párrafo narra el éxodo de los habitantes de Miseno. La muchedumbre huye despavorida y desalentada: Plinio el Joven y su madre abandonan al fin la ciudad, y ya en pleno despoblado nos cuenta que «... apenas nos habíamos parado, reinó la obscuridad más espantosa, una obscuridad, no de noche sin Luna o con nubes, sino la de un local cerrado cuando se apaga la luz. No más hubieras oído alaridos de mujeres, vagidos de niños y gritería de hombres: unos llamaban a gritos a los padres, a los hijos o bien a los cónyuges; los otros, a gritos les respondían. Unos se lamentaban de su suerte; otros de la de los parientes. Los había que por miedo a morir imprecaban a la muerte; muchos levantaban las manos hacia los dioses; la mayoría tenían la creencia de que nunca hubo dioses y que aquella era la eterna y última noche del mundo... De pronto el fuego se acerca, un resplandor rompe la obscuridad; pero la masa ígnea se para un poco lejos...; después otra vez las tinieblas; otra vez ceniza espesa y densa».

Por la descripción de Plinio se evidencian los estragos y aun las hecatombes que las erupciones han producido y pueden producir en las regiones circundantes. No obstante, el estudio demográfico de las mismas acusa cifras muy elevadas que demuestran que se trata de comarcas destacadas por su riqueza. La región de Campania, alrededor del Vesubio, arroja una población re-

lativa de 508 habitantes por kilómetro cuadrado; la isla de Ischia, 872 almas por igual espacio, y la comarca del Sudeste del Etna, 1.129 habitantes por kilómetro cuadrado, densidad casi solamente alcanzada en las grandes aglomeraciones industriales del Rhur, Silesia o Bélgica. Este fenómeno, que se repite constantemente, se explica por la fertilidad de los terrenos formados a costa de lavas y cenizas, ricas en productos ferruginosos y fosforados, que ofrecen excelentes condiciones para el cultivo y de gran rendimiento en la producción agrícola. Cabe añadir todavía una infinidad de recursos económicos: explotación del azufre, ácido bórico, aguas termales, etc.

### Volcanes y productos volcánicos

El magma endosférico, al encontrar una perforación en la corteza terrestre, expelle al exterior, a una elevada temperatura, una parte del contenido ígneo; el punto de la superficie donde tiene efecto la salida de los productos internos se denomina *volcán*, y la grieta por la

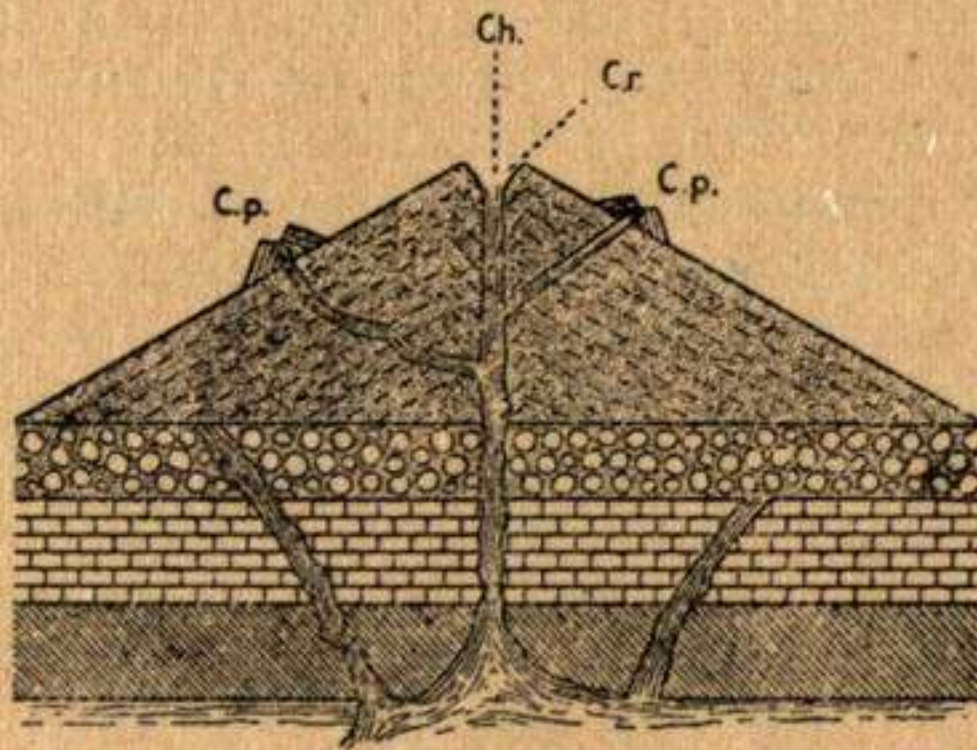


Fig. 25.—Corte de un volcán.  
Ch., chimenea; Cr., cráter;  
C.p., conos laterales o parásitos.

cual ascienden las materias en fusión es la *chimenea volcánica*. Aunque no siempre se presenta, ordinariamente, alrededor del orificio de emersión se acumulan las materias sólidas y fundidas que irrumpen de las profundidades del Globo y constituyen el llamado *cono*

o *aparato volcánico* (fig. 25), que en algunos casos llega a alcanzar alturas considerables. (El Coropuna — Perú — tiene 6.620 metros y el Chimborazo — Ecuador —, 6.310 metros).

En las erupciones irrumpen sustancias sólidas, líquidas y gaseosas, cuya proporcionalidad y momento de emersión dependen de las circunstancias que concurren en la erupción volcánica.

Ordinariamente, la proximidad de la erupción se insinúa con temblores de tierra, movimientos bruscos del mar y ruidos subterráneos, unos y otros más o menos intensos, aunque localizados en el área circundante del volcán. Luego, un estampido formidable, a veces seguido de otros varios menos fragorosos, anuncia el comienzo del trastorno eruptivo. Dichas detonaciones son debidas al estallido de las materias que taponan el conducto o chimenea y a la explosión o explosiones de los gases y vapores sometidos a presiones enormes y a temperaturas elevadísimas en el interior del volcán. La energía mecánica de la masa gaseosa, derivada principalmente de la fuerza expansiva del vapor de agua, pulveriza las rocas de la chimenea, eleva sobre el cráter las descomunales columnas nebulosas de aspecto piniforme (la del Vesubio, en 1906, alcanzó 6 kilómetros de altura según unos testigos oculares y 8 ó 10 según otros) y proyecta con violencia piedras y tierras, arenas y cenizas y cuantas sustancias sólidas encuentra a su paso. Las columnas de gases suelen ser transparentes y por las noches resplandecen reflejando los rayos luminosos del magma incandescente del cráter y comunican un aspecto siniestro al paisaje. Otras son más tupidas y cargadas de magma pulverizado; rodean los flancos del aparato volcánico y constituyen verdaderas nubes de fuego con una velocidad ciclónica capaz de causar los mayores estragos (la del Monte Pelado, de la Martinica, en 1903, destruyó la ciudad de San Pedro y causó, por asfixia, la muerte de 28.000 habitantes).

Cuando cesa el impulso explosivo de los gases, aparece la *lava*, el magma líquido o rocas en fusión, sola o mezclada con productos sólidos. Suele ascender por el interior de la chimenea, rellena la concavidad del cráter, rebasa los bordes y se desliza por las laderas en forma de *corrientes*. Con frecuencia el líquido afluye por las hendiduras o grietas de los flancos, con aparato

volcánico o sin él. Hay lavas muy flúidas, las cuales se escurren rápidamente, a manera de ríos de metal fundido, por valles, barrancos y torrentes, hasta cubrir extensas superficies; en cambio, otras son muy viscosas, de marcha lenta y apenas se apartan de los alrededores. Estas últimas, a menudo forman *cúpulas* o *pitones*, que son masas de lava pastosa que se endurece en el interior del cráter taponando el orificio de salida; por la fuerza expansiva de los gases internos sufren un abombamiento que alcanza bastantes metros de altura y cuya bóveda puede ser destruída por explosiones posteriores. La fluidez y viscosidad de las lavas dependen de la composición química y de la temperatura. Las básicas, en que abundan el calcio, el magnesio y el hierro, son oscuras y pesadas; constituyen los *basaltos*, se corren a largas distancias y dominan en las zonas volcánicas del Atlántico. Las ácidas, en las que preponderan la sílice libre, el aluminio y algunos álcalis, son claras y ligeras; originan las *traquitas*, *andesitas* y *liparitas*; se sitúan en regiones próximas al volcán y caracterizan el círculo eruptivo del Pacífico. La región exterior de la corriente de lava y la que está en contacto con el suelo se enfrían rápidamente y se solidifican pronto, por lo que presentan aspecto escoriáceo; las dos internas inmediatas aparecen divididas en losas, y la central, la más tardía en la solidificación, adquiere la forma prismática, formando bellos cantiles columnares como el de Olot y el que en Irlanda ha dado origen al legendario paraje de la Calzada de los Gigantes, descrito por Pierre Benoit.

En la explosión de gases y vapores y aun mezclados con la lava, son expelidos también diversos productos en estado sólido. Unos son materiales arrancados de las paredes de la chimenea o de la base del volcán y no pueden conceptuarse como sustancias volcánicas; otros son originados por la lava procedente de erupciones anteriores que taponaba el cráter o por la agrupación y enfriamiento de las partículas magmáticas finísimas, en forma de cenizas, esparcidas por el aire al tener lugar la explosión. Estos productos eruptivos, según tamaño y forma, reciben los siguientes nombres: pequeños *bloques*, de figura irregular, de veinticinco centímetros a un metro de diámetro; *bombas volcánicas*, de menor volumen y forma redondeada o fusifor-



me; *lapilli* (*greda* en Olot), cuando aparece como gravilla escoriácea del grosor mínimo de una avellana; *puzolana*, si los materiales son de menor calibre y de superficie lisa; *cenizas volcánicas*, cuando son de estructura pulverulenta integrada por gotitas de vidrio y cristalitos diminutos, y *cabellos de 'pele*, si son filamentos de lava a semejanza de vidrio estirado.

En un período póstumo, la mayoría de los volcanes, después de extinguidas las emisiones flúidas, continúan con prolongados desprendimientos de gases y vapores, testimonios de la lenta agonía del fenómeno propulsor de la pasada convulsión (El Vulcano, desde la última etapa eruptiva ocurrida en 1906, sigue emitiendo gases).

Hay volcanes cuya actividad parece ser constante como el Estrómboli, que hace más de dos mil años que emite lava incesantemente; otros, como el Vesubio, alternan sus fases de *calma* con las de *paroxismo*, y, finalmente, existen cráteres completamente *apagados*, ya temporalmente, en espera de nuevos trastornos, ya extintos con carácter definitivo, como los de Olot, Cabo de Gata, región volcánica de Ciudad Real, en la Península Ibérica, y una gran porción de los de Norteamérica. Además, cabe observar una prudencia extrema en clasificar un cráter como apagado. Así, el Vesubio, hasta el año 79 era tenido como cráter muerto; pero en dicho año produjo la hecatombe descrita por Plinio. Se consideran como extintos los volcanes que no han ofrecido veleidades eruptivas en el período histórico.

### Tipos de volcanes

No todos los volcanes presentan los mismos caracteres; pero pueden agruparse en cuatro tipos, atendiendo a las características de la erupción (fig. 26).

*Tipo Hawaiano.* — El Kilauea, de las islas Hawai, nos brinda el ejemplar más destacado de los conos de lava. La erupción es permanente y tranquila; no se produce la intensa explosión de gases ni se forman nubes. El cráter, apenas insinuado, es ancho y bajo, de dos a tres kilómetros de diámetro; mejor puede decirse que es un lago flúido que se renueva constantemente. En esta clase de volcanes se inician corrientes basálticas de notable recorrido. (La del Matawanu, de la isla Hawai, en 20 de octubre de 1909 rebasó los 12 kiló-

metros, terminando con una cascada de fuego sobre el océano).



Fig. 26.—Tipos de volcanes. De arriba abajo: tipos hawaiano, estromboliano, vulcaniano y peleano (Allix).

po de las Eolias, es el más significativo de los clásicos volcanes de escorias y lava. Las erupciones van precedidas de fenómenos sísmicos y se inician con una formidable explosión que arranca enormes cantidades de materiales de todas clases (La del Krakatoa, en 1883,

*Tipo Estromboliano.*—El Estrómboli, en la isla de su nombre, frente al estrecho de Mesina, es el prototipo de los conos de bombas y lapilli. Las erupciones de este volcán, aunque de carácter explosivo con lanzamiento de bombas y lapilli, no suelen ir acompañadas de terremotos. La masa gaseosa forma altas nubes limpias y transparentes que reflejan el resplandor de la lava a manera de faro natural muy conocido de los navegantes. En el interior del cráter aparece un pequeño lago de lava fundida que se endurece muy pronto; frecuentemente, la corriente de lava irrumpe por los flancos del volcán, pero la fluidez es algo menor que en el tipo precedente. Pertenecen a este tipo los de las regiones volcánicas de Olot y de Auvernia.

*Tipo Vulcaniano.*—El Vulcano, en la isla de su nombre, también como el Estrómboli en el gru-

FENÓMENOS VOLCÁNICOS



Volcán Ubinas (Perú).

(Foto. The National Geographic Magazine)

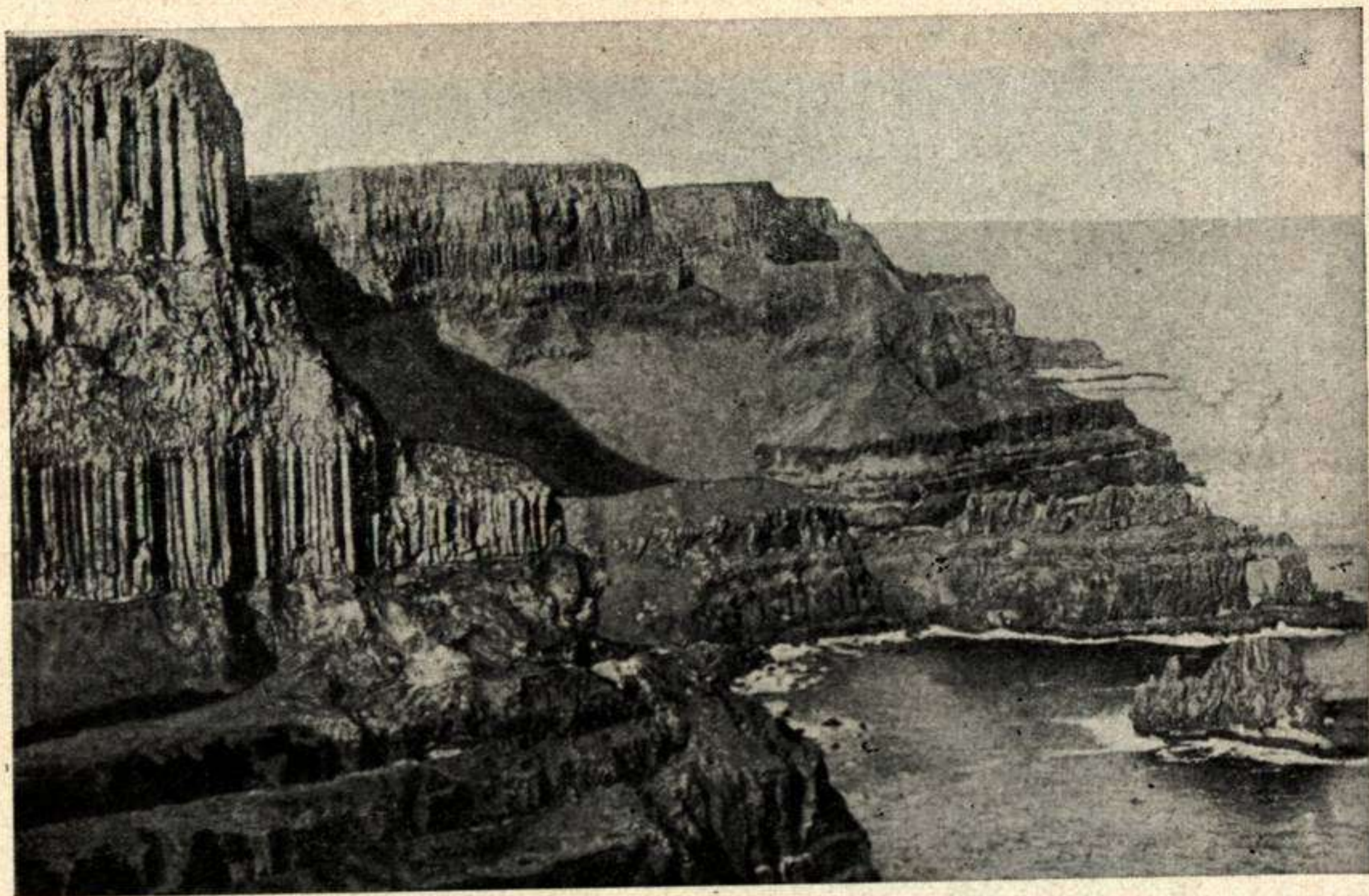


FIG. 1. — Columnata basáltica de la Calzada de los Gigantes, en el norte de Irlanda.  
(Foto. Zeydlitz'che Geografie)



Instituto San sidro de Madrid 2599 **FIG. 2. — El cráter del Ubinas, en el Perú.**  
(Foto. The National Geographic Magazine)

hizo saltar media isla de este nombre y sus partículas fueron arrastradas por el viento, notándose su presencia en los crepúsculos por casi toda la Tierra), formándose *calderas* gigantescas, en las que surgen lagos y conos de segundo orden. Enormes y elevadísimas nubes, densas y opacas y cargadas de bombas y cenizas, se levantan sobre el cráter. Las emisiones de lava son frecuentes y abundantes, y aunque de consistencia viscosa, a menudo originan corrientes de importancia. El Vesubio, el Etna, el Teide, el Sangay corresponden a este grupo.

*Tipo Peleano.* — El volcán del Mont Pelée, en la isla de la Martinica, es un ejemplo magnífico de las erupciones con nubes de fuego. La principal característica radica en la densidad de las masas gaseosas, expulsadas violentamente, opacas y cernidas de cenizas ardientes; se acumulan en las partes bajas de la atmósfera y adquieren velocidades ciclónicas, rodando por los flancos de la montaña y arrasándolo todo a su paso. La lava es pastosa, muy espesa, por lo que en esta clase de conos son frecuentes las cúpulas o pitones.

La división anterior corresponde al geólogo francés Lacroix, en su notable estudio referente a los fenómenos volcánicos de la Martinica, y se basa en la disminución gradual en la fluidez de la lava. Los vulcanistas alemanes, especialmente, han sistematizado otra clasificación menos simplista, pero más adaptada a la realidad, en la cual se comprenden cuatro secciones: *volcanes de lava*, *volcanes de escorias*, *volcanes de lava y ceniza* y *volcanes compuestos*, con varios tipos en cada una de ellas, de los cuales daremos una breve noticia.

I. MANTOS DE LAVA. — La lava emerge muy flúida y en grandes proporciones por las numerosas grietas que inciden en el terreno, y origina nutridas corrientes basálticas que recubren comarcas enteras. Las mesetas lávicas del Dekán son mantos consolidados. Como al mismo tiempo hay explosión de gases y lanzamiento de productos, éstos alternan con las capas de lava. Con el tiempo estas sedimentaciones alcanzan un espesor de centenares de metros.

*Volcanes discoidales o escutiformes.* — Corresponden al tipo hawaiano de Lacroix.

*Conos de lava.* — En estos volcanes la lava tiene una fluidez media, se escurre con facilidad por los flancos, y forma conos muy elevados con un solo cráter en la

cumbre y pendientes de fuerte inclinación. El Cotopaxi, el Chimborazo, el Cayambe y algunos de las islas Filipinas, corresponden a este tipo.

*Cúpulas volcánicas.* — Corresponden al tipo peleano de Lacroix.

*Lacolitos.* — Son intrusiones lávicas en las capas superiores de la corteza, las cuales abomban la superficie terrestre pero no llegan a perforarla, y, por tanto, no tiene lugar la salida del magma líquido (fig. 27).

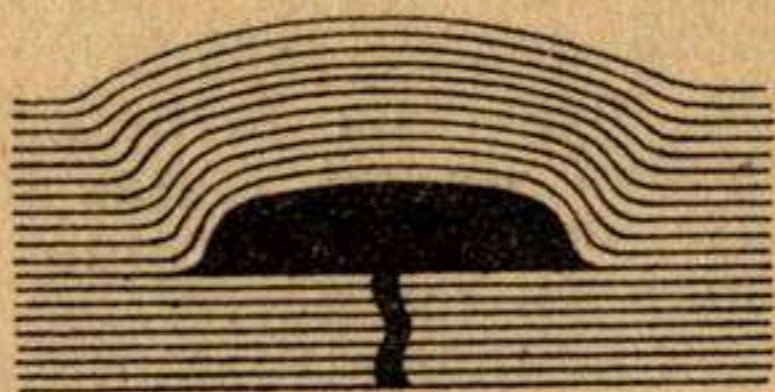


Fig. 27.—Lacolito.

II. VOLCANES DE ESCORIA. — A esta rama atañen los conos erigidos con los productos expulsados en las explosiones de gases, abarcando los tipos siguientes:

*Conos de escorias.* — Corresponden casi enteramente al tipo estromboliano de Lacroix. Las bombas, lapilli y cenizas, a expensas de la lava pulverizada, se ciernen alrededor de la chimenea y forman un cono de escorias (fig. 28).



Fig. 28.—Volcán de cenizas (Preyer y Zirkel).

*Maares o lagos volcánicos.* — Las explosiones de gases acarrear a veces la formación de cavidades en salidas distintas del cráter, que se convierten en depósitos acuáticos, como el Albano y el Nemi en Italia. Otros, como L'Étang Sec de la Martinica y la laguna de la Posadilla en los Campos de Calatrava (Ciudad Real), se forman en antiguos cráteres circulares (fig. 29, 1).

«Necks» o embudos volcánicos. — Con las explosiones de gases pueden producirse perforaciones que luego se rellenan de bloques y piedras que proporcionan la rotura de rocas adyacentes y aun de materiales volcánicos. Los ingleses les llaman *necks* y tienen forma de embudo de un diámetro que oscila, en la superficie, entre dos metros y algunos hectómetros. Son los placeres diamantíferos del Transvaal, Brasil, India, etc. (fig. 29, 2).

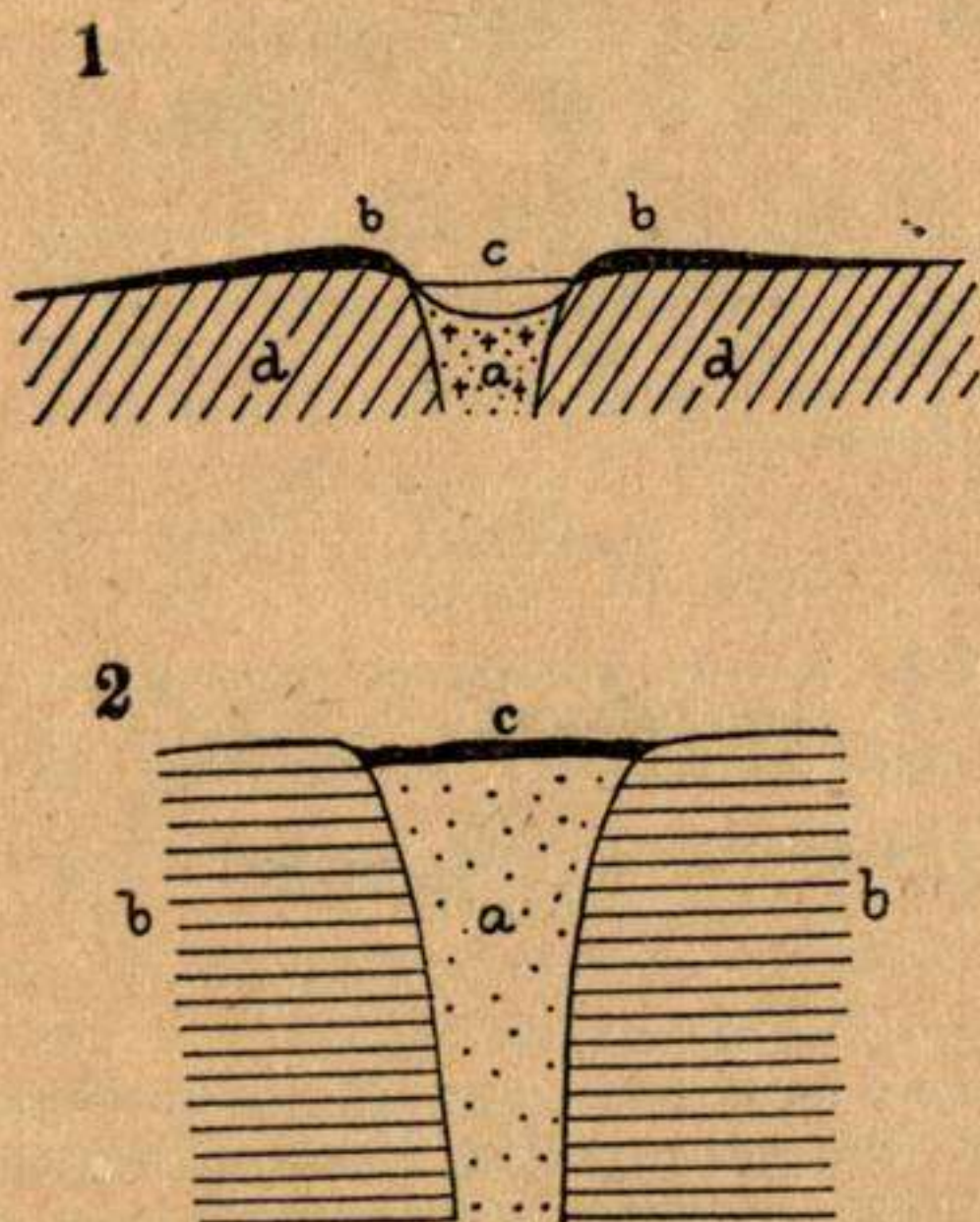


Fig. 29.—1, Maar o lago volcánico.  
2, Neck o embudo volcánico.

III. VOLCANES DE LAVA Y CENIZA. — Corresponden al tipo vulcaniano de la clasificación precedente. En el cono alternan las capas de ceniza y de lava (fig. 30).

*Volcanes en herradura.* — En esta clase, debido sin duda a que la corriente, al salir al exterior por un cráter lateral, arrancó un fragmento de los flancos del cono, el volcán adopta la forma de herradura o media luna. Ejemplo, el volcán de la Garrinada, en Olot.

IV. VOLCANES COMPUESTOS. — Estos volcanes disponen de una gran caldera, tal vez efecto de una violenta

explosión o de un posterior hundimiento del cráter. En el interior de esas extensas cavidades (la caldera oval del Teide conocida por Las Cañadas mide 60 kilómetros de largo y 500 metros de alto) se elevan conos de segundo orden, producto de erupciones posteriores.

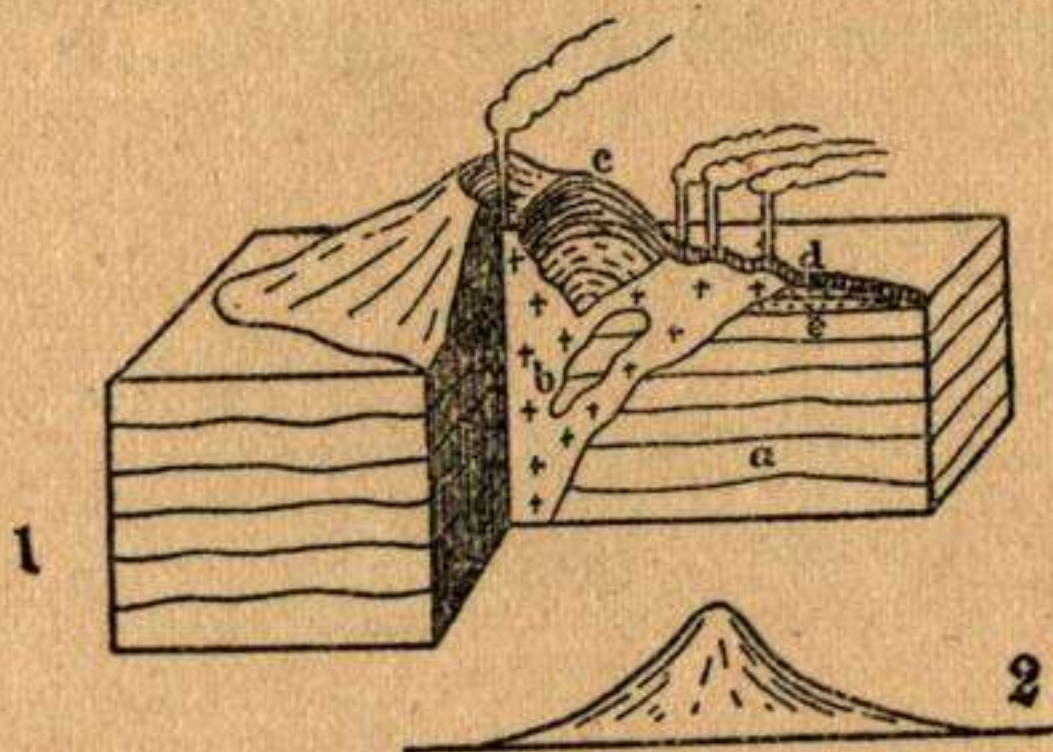


Fig. 30.—1. Volcán de lava y ceniza. *a*, substrato; *b*, lava; *c*, cono de cenizas; *d*, corriente de lava.  
2. Perfil de un cono de lava (Pas-sarge).

El Vesubio posee también una gran caldera. No es difícil encontrar en este grupo coincidencias de dos o más tipos, aunque manifestados en época distinta.

### Efectos posteriores del volcanismo

Como consecuencia de una más o menos pretérita actividad ígnea, se encadenan con ella unos cuantos fenómenos que merecen cita especial.

Aparecen en primer lugar las *fumarolas*, que consisten en emanaciones de gases que tienen lugar en la mayoría de los volcanes una vez extinguida la erupción. Se clasifican según la temperatura y composición química, recibiendo el nombre especial de *solfataras* las que contienen anhídrido sulfuroso y de *mofetas* las que salen a la temperatura ordinaria y llevan anhídrido carbónico. Aquéllas revisten interés económico por los se-



dimentos de azufre que forman. (En Sicilia los yacimientos alcanzan 1.296 kilómetros cuadrados y encierran aún más de 30 millones de toneladas, dando lugar a industrias en las que trabajan 10.000 obreros.) Las fumarolas, además, representan un testigo de inestimable valor humano para la predicción de la proximidad de una erupción volcánica. En efecto, cuando se aproxima un paroxismo, las fumarolas de las proximidades del volcán aumentan de temperatura, hasta alcanzar el límite que suelen tener en los momentos de la erupción; de esta forma, la constante vigilancia sobre las variaciones térmicas de las fumarolas puede salvar infinidad de vidas.

Las aguas que discurren por las grietas de las regiones volcánicas dan lugar a los *geyseres* o surtidores intermitentes, que, como los del Parque de Yellowstone, pueden elevarse a 150 metros de altura, a las *fuentes termales*, manantiales en que el agua brota a temperatura que excede a la ordinaria, y a los *sofioni*, surtidores de vapor de agua cargado de ácido bórico.

### Distribución geográfica de los volcanes

En la época geológica anterior a la actual se intensifica la actividad volcánica en gran parte de la superficie terrestre, de la que quedan vestigios en las innumerables series de volcanes apagados que existen en todos los continentes.

En cuanto a su distribución, la mayoría de los volcanes extintos o activos se alinean siguiendo los plegamientos alpinos, o sea alrededor del Pacífico y a lo largo de la línea mediterránea.

El foco eruptivo principal jalona las costas del Pacífico. A lo largo de la cadena montañosa que perfila el reborde occidental americano, en el litoral y en el ciclo de las islas que cubren el Oriente y Sudeste asiáticos y en los archipiélagos que salpican el Gran Océano, surgen potentes más de doscientos cincuenta conos volcánicos que forman un verdadero cinturón de fuego, del que sólo se libra hasta cierto punto el continente australiano. En este círculo figuran los volcanes más altos de la Tierra, como el Coropuna (6620 m.), el Misti (6000 m.) y el Ubinas, en el Perú; el Sangay (5325 m.), el Chimborazo (6310 m.) y el Cotopaxi (5943 m.) en el

Ecuador, el Orizaba (5594 metros) y el Popocatepetl (5450 m.) en México. El llamado círculo de fuego queda cerrado por los volcanes del Japón, Filipinas, Borneo, Java y demás que bordean las costas asiáticas.

Circunvalando el Mediterráneo se encuentran los conos extintos de la Península Ibérica, los apagados y los sumamente activos del relieve italiano e islas vecinas, y los que rodean el mar Egeo. Siguiendo la misma línea tectónica tenemos las Azores, Canarias y América Central.

El volcanismo falta en las regiones llanas, lejanas a los plegamientos alpinos, Norte de Eurasia, plataformas brasileña y africana, etc. Las solas excepciones a esta regla se dan en los antiguos macizos afectados por fracturas importantes, como en la desgarradura occidental de la tabla africana (Kilimandjaro), y las del macizo central francés (Chaîne des Puy, de Auvernia).

### Teoría del volcanismo

Durante mucho tiempo se pretendió explicar el volcanismo por la teoría *acuosa*. El hecho de que la mayoría de los cráteres se hallasen bordeando los océanos o en el fondo marino, indujo a la conclusión de que las erupciones tenían su raíz en la irrupción del agua en el magma a través de las grietas que perforan el zócalo continental sumergido.

Esta teoría, en primer término, no justifica satisfactoriamente cómo la masa de los productos volcánicos busca su salida en cráteres situados a grandes altitudes, para lo cual es necesario que venza la resistencia y presión del importante espesor de capas pétreas, cuando se presenta una vía tan fácil y asequible como el propio conducto de la grieta de intrusión acuática. En segundo lugar, tampoco razona la existencia de volcanes a algunos centenares de kilómetros del mar, como los de la meseta tibetana o los del desierto del Sahara.

Modernamente, el hecho de que los conos volcánicos jalonan las líneas de fractura de la corteza terrestre o coincidan en las áreas en que se halla dislocada, dió lugar a la teoría *tectónica*. Hemos visto que, para las erupciones, es indispensable una perforación de la costra que relacione la superficie con las profundidades en que yacen las lavas y gases. El geodinamismo, con sus fallas,

establece esas comunicaciones o determina los puntos de mínima resistencia que fácilmente puede superar la fuerza expansiva de los vapores acumulados en la endosfera, cuya tensión se halla aumentada considerablemente en los momentos de regolfo del magma o cuando éste se halla oprimido por los sedimentos que se hunden.

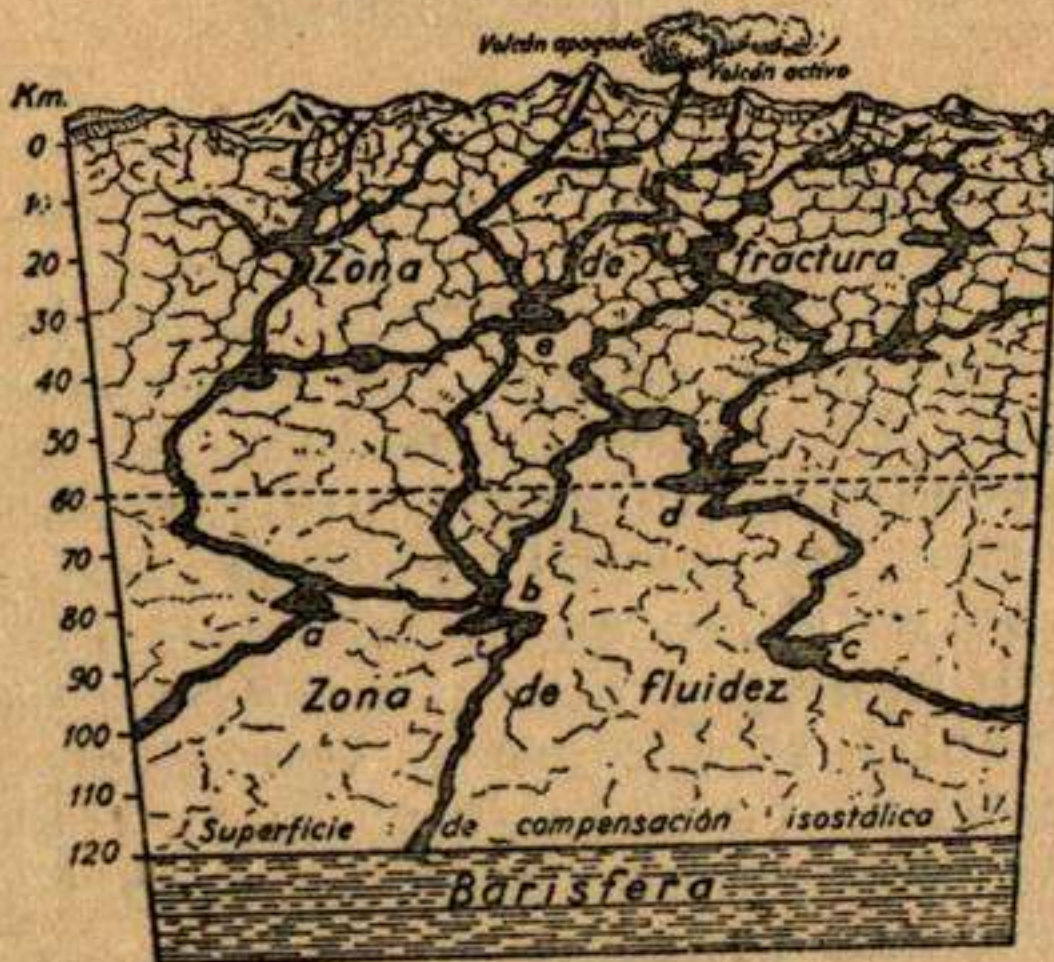


Fig. 31.—Las dos zonas de la corteza terrestre en que se producen las actividades volcánicas; a, b, c, d, e, focos volcánicos periféricos (Inglada).

La geofísica moderna permite explicar esta conexión entre fallas y volcanes. A escasa profundidad los materiales alcanzan temperatura suficiente para fundirse, pero lo impide la presión. Si por una circunstancia cualquiera (fractura, pliegues, etc.) disminuye la presión, los materiales rígidos se liquidan y los gases liberados abren el camino del magma a través de las fracturas o zonas débiles de la corteza (fig. 31).



## CAPÍTULO VII

### TERREMOTOS

#### El fenómeno sísmico

Entendemos por sismo, terremoto o temblor de tierra las trepidaciones y sacudidas que experimenta el suelo a consecuencia de movimientos bruscos, de corta duración y a veces muy intensos, que tienen lugar en la corteza terrestre en correspondencia con un golpe o choque que se produce en el interior de la litosfera. La ciencia que tiene por objeto el estudio de estas conmociones violentas se denomina *Sismología*.

El punto, situado en el interior de la Tierra, en donde se inicia el movimiento, es el *hipocentro*, y el punto de la superficie más próximo a este foco interno de perturbación se conoce por *epicentro*; éste se halla situado en el extremo del radio que pasa por aquel punto (figura 34).

Cuando entra en movimiento una porción del interior de la corteza terrestre, la vibración se propaga en todas direcciones formando *ondas sísmicas*, concéntricas, exactamente igual que cuando al caer un objeto en un estanque se originan en la superficie tranquila de las aguas ondulaciones que propagan en todas direcciones la perturbación producida en aquel punto. De ser homogénea la estructura y composición de las rocas, dichas curvas esféricas serían regulares y concéntricas, pues se propagarían con igual velocidad en todos sentidos; pero, dada la heterogeneidad de aquéllas, las ondas sísmicas son figuras esferoidales o elipsoidales un tanto intrincadas. La velocidad y demás particularidades que concurren en la propagación de las ondas sísmicas por el interior de la Tierra permiten juzgar acerca de la elasticidad, naturaleza y propiedades físicas del medio que atraviesan. Son, por consiguiente, un emisario maravillosamente preciso que nos permite te-

ner comunicación con el interior del Globo. Y así como la luz facilita al astrónomo el medio de descifrar las particularidades del firmamento, la onda sísmica constituye para el geólogo a modo de una comunicación inalámbrica casi constante con el interior de nuestro planeta. Sin estos dos emisarios misteriosos, pero descifrables, nada sabríamos acerca del mundo que se cierne sobre nuestras cabezas o del que se extiende bajo nuestras plantas.

*Clases de ondas.* — Del hipocentro parten dos clases de ondas sísmicas; las unas, en las que la partícula que transmite el movimiento vibra paralelamente a la dirección de propagación del mismo, son las llamadas *ondas longitudinales*; otras, las *transversales*, que se producen por la vibración de las partículas en dirección normal a la anterior, perpendicularmente a la dirección con que se propaga el movimiento, iguales estas últimas a las que se forman al agitar la superficie tranquila de las aguas. Estas ondas se propagan por el interior y al llegar al epicentro transmiten el impulso vibratorio por el suelo, originando otra clase de ondas, las *superficiales*, que viajan por la periferia de la litosfera; en algunos casos dejan impresa la huella de su paso con suaves y ostensibles ondulaciones en el suelo.

La velocidad media es diferente para cada clase de ondas; para las longitudinales, 12.000 metros por segundo; para las transversales, 6.500 metros; para las superficiales, 3.800 metros, y de éstas, las que son visibles, viajan a razón de 200 metros por segundo. Esta velocidad media puede sufrir variaciones de importancia en relación con la capacidad de las rocas, intensidad de las ondas, etc. Por esto no se percibe el terremoto a la misma hora en toda la Tierra, sino que varía con la distancia al epicentro y con las circunstancias de la región atravesada por la onda sísmica. A partir del foco epicentral, las curvas que unen todos los puntos en que se dejó sentir la sacudida a un mismo tiempo se llaman *homosistas*, y se comprende fácilmente el interés que tiene su estudio para el geólogo, con objeto de establecer las relaciones entre la marcha de la onda y los accidentes tectónicos del terreno atravesado.

*Características de los terremotos.* — Los terremotos comienzan por una *fase inicial*, en que las ondas precursoras del temblor son muy débiles; sigue una segunda

fase, la *principal*, en que las sacudidas adquieren la máxima intensidad, y acaban con la fase final, en que las ondas *secundarias* van decreciendo hasta su total desaparición. El conjunto constituye el llamado *período sísmico*.

La intensidad de las sacudidas depende sobre todo de la amplitud de las ondas, la cual no es nunca superior a 25 milímetros, y se gradúa en concordancia con los efectos que producen. La escala se inicia con las vibraciones, imperceptibles por los sentidos, pero manifestadas por los aparatos registradores, extremadamente sensibles, y termina por las que originan verdaderas catástrofes. Las curvas que unen los puntos de la Tierra en que se nota igual intensidad se llaman *isosistas*. Las estaciones sismológicas clasifican las observaciones anotadas por la red de observadores según la llamada *Escala de Mercalli*, que consta de 12 términos, cuya intensidad aumenta teniendo en cuenta el número de personas que perciben el trastorno (las más sensibles o las situadas en los pisos altos) y los efectos causados (oscilación de lámparas, vibración de los cristales, agrietamiento de paredes, hundimiento de casas, etc.).

Pero todas las particularidades referentes a los terremotos que interesan a la sismología (hora, intensidad, estragos, etc.), y entre ellas las dos fundamentales, que son la posición del epicentro y la del hipocentro, no se pueden relegar a la simple observación personal, que se halla sujeta a errores de trascendencia por la perturbación producida ante los efectos del fenómeno, sino que es preciso recurrir a instrumental adecuado, que son los aparatos registradores empleados por los observatorios geofísicos.

### Aparatos sísmicos

Desde muy antiguo se han empleado aparatos registradores de los sismos. Por su finalidad se clasifican en *sismoscopios* y *sismógrafos*.

Los *sismoscopios* sirven únicamente para indicar que ha ocurrido el fenómeno sísmico y aun, a veces, por algunos dispositivos especiales, se puede determinar el momento, la dirección y la intensidad de las sacudidas, si bien de un modo deficiente, sirviendo para ello cualquier objeto en equilibrio inestable, como, por ejem-

plero, columnas verticales de distinto peso y longitud. Para conocer la dirección, en China y en el año 136 antes de Jesucristo, Choko inventó un aparato consistente en una semiesfera hueca, con un mango en el polo, hacia la mitad de la curvatura; tenía ocho cabezas de dragón, equidistantes, y cada una de ellas con una bolita que podía recibir una rana, con la boca abierta, situada debajo de la respectiva cabeza. Con la sacudida se movía la semiesfera y caían las bolitas correspondientes a la línea directriz del movimiento.

Los *sismógrafos* son aparatos mucho más perfectos, con los cuales se puede estudiar con fidelidad las características de los sismos. Los diversos tipos de sismógrafos usados en los observatorios son análogos, se inspiran en los mismos principios científicos y tienen como elemento esencial un péndulo y un aparato registrador (fig. 32).

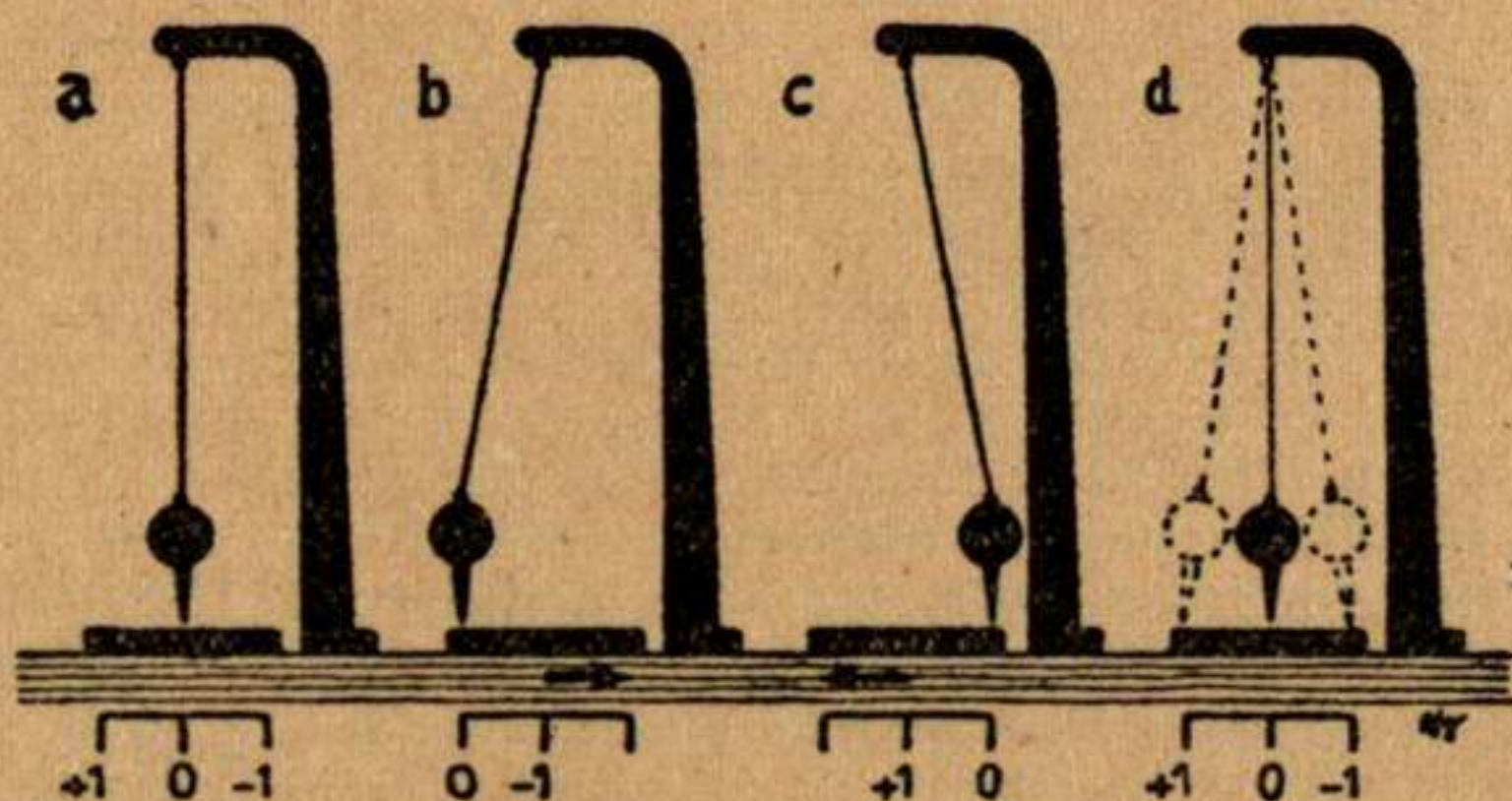


Fig. 32.—Principio del sismógrafo moderno (Sieberg). *a*, Posición de reposo; *b* y *c*, movimiento del soporte durante el sismo; *d*, oscilaciones propias del péndulo.

El uso del péndulo se fundamenta en el principio de que, aunque entre en vibración el punto de suspensión o el soporte del péndulo, éste permanece invariable; sólo al cabo de bastante tiempo se transmite el movimiento y empieza a oscilar la masa del péndulo, pero esto se evita dotándole de gran masa (los hay que pesan de 1.000 a 14.000 kilogramos) con objeto de aumentar el momento de inercia e interponiendo además entre

el estilete unido al péndulo y el aparato registrador unos *amortiguadores* consistentes en láminas metálicas sumergidas en un líquido espeso (glicerina, etc.), con el fin de reducir al mínimo la oscilación pendular. Así se logra prácticamente un punto fijo en el espacio, independiente de las oscilaciones del suelo. En cambio, el aparato registrador sujeto al pavimento vibra con éste, con lo cual el estilete del péndulo señala sobre una banda de papel ahumado el movimiento sufrido por el suelo. El sistema de inscripción, como en los barógrafos y termógrafos, es suficientemente ampliado para que sea más fácil y asequible la interpretación de los llamados *sismogramas*. El sismograma viene a ser el enigmático telegrama cifrado escrito por el estilete pendular sobre el papel del aparato registrador por la onda sísmica emisaria, y al cual deberá dedicar toda su atención el sismólogo.

El estudio del sismograma permite deducir los detalles y circunstancias de cada terremoto, las particularidades con que se han producido las ondas sísmicas diversas y los efectos probables en personas y edificios, calcular la profundidad del hipocentro y la distancia de la estación al foco epicentral.

*Interpretación de los sismogramas.* — Toda la ciencia sismológica, y aun la mayor parte de la geofísica se basa en la lectura y descifrado de estas líneas enigmáticas inscritas por el estilete pendular del sismógrafo.

Se ha observado que los sismogramas registrados en la región epicentral son muy distintos de los inscritos en las regiones alejadas del epicentro. En aquéllas, las ondulaciones descritas por el estilete están muy juntas y son poco distintas entre sí; en los lejanos a la región afectada por el sismo la inscripción es mucho más clara, y las distintas fases aparecen mejor individualizadas a medida que nos alejamos del epicentro. La explicación de este hecho no es difícil; en el primer caso, las ondas longitudinales, que por ser las más veloces son las primeras en registrarse, apenas se han separado de las transversales cuando alcanzan el epicentro, por lo cual se inscriben casi simultáneamente; en cambio, en los sismos lejanos, llegan perfectamente individualizados los distintos grupos de ondas, dando lugar a las tres fases que se registran en el sismograma típico (figs. 33 y 34).



## Fenómenos que acompañan a los sismos

Los terremotos suelen ir acompañados de fenómenos varios; pero, de los relacionados directamente con ellos, los más destacables son únicamente los *ruidos sísmicos* y los *maremotos*.

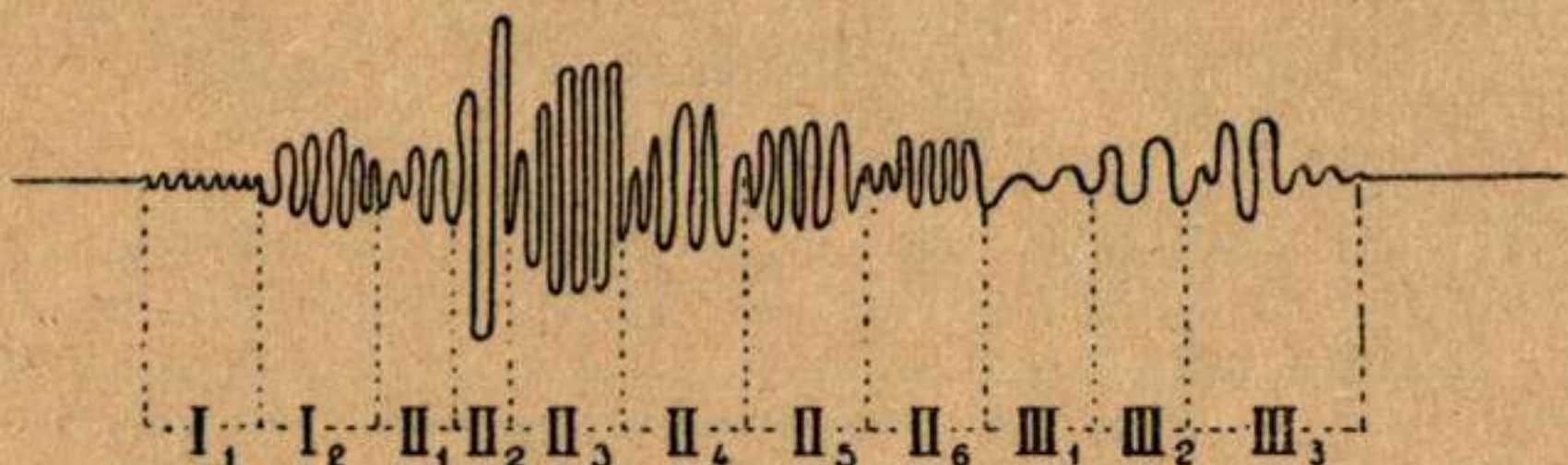


Fig. 33.—Sismograma tipo (Montessus de Ballore). I, Fase inicial. II, Fase principal. III, Fase final o cola del sismograma.

Los retumbos o fenómenos acústicos, son ruidos graves, más o menos intensos, parecidos al que produce el paso de los trenes por un puente de hierro, o al de un furgón de artillería en marcha. No se notan siempre en todos los sismos; pueden preceder, coincidir o seguir al terremoto, y se opina que son debidos a las vibraciones longitudinales que transitan por las capas rocosas e inciden en el aire.

El *maremoto* se inicia con el retroceso del mar, y a continuación se forma una ola gigantesca que avanza imponente sobre el litoral, destruyendo cuanto encuentra a su paso.

Según algunas opiniones, la ola sísmica se debe exclusivamente al temblor de tierra. Pero con ello no se explica el retroceso del agua antes de que surta efecto la primera sacudida; tampoco se comprende cómo on-

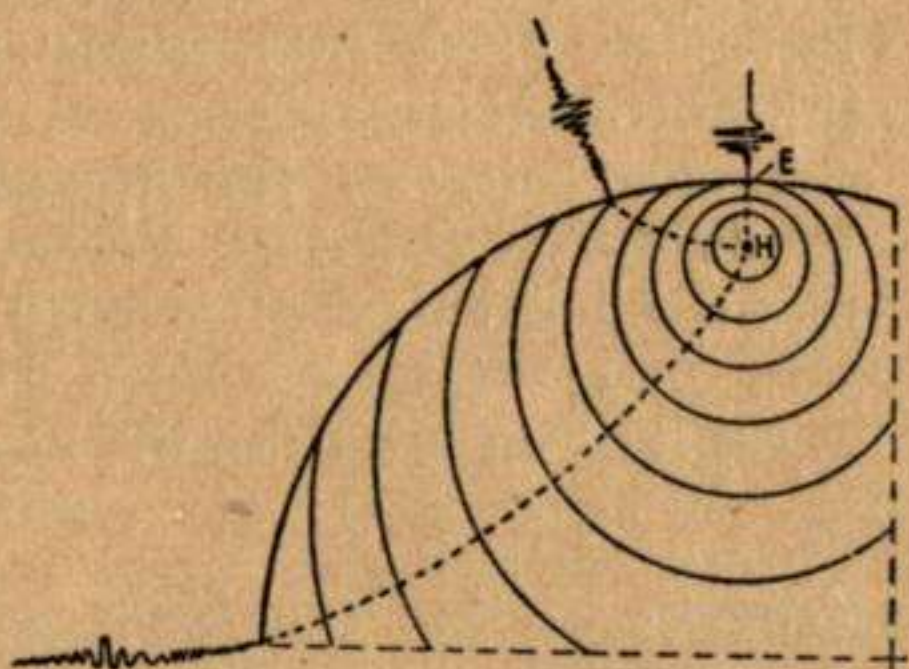


Fig. 34.—Propagación de las ondas sísmicas. H, hipocentro; E, epicentro. Las distintas fases del sismograma aparecen mejor individualizadas a mayor distancia epicentral.

dulaciones de pocos centímetros pueden producir olas de altura tan desproporcionada que en ciertos casos han alcanzado hasta treinta metros, y aun es menos inteligible la existencia de tales fenómenos sin sismos de ninguna especie.

Los maremotos se razonan satisfactoriamente con la siguiente teoría. Cuando ocurre un derrumbamiento en el zócalo marino, surge un vacío que el agua oceánica tiende a ocupar en seguida, y en virtud de las leyes de equilibrio de las superficies líquidas se originan dos corrientes opuestas que convergen en el propio lugar encontrarse ambas corrientes, la del litoral regolfa y se manifiesta con el retroceso del mar al iniciarse el maremoto; la segunda deriva de regiones lejanas de la costa y recibe el impulso de toda la masa oceánica. Al encontrarse ambas corrientes, la del litoral regolfa y se eleva enormemente, y con el empuje de la otra, más potente, inunda la zona costera con una energía mecánica capaz de causar estragos de consideración. Luego, la gran mole de agua retrocede y origina la *ola de retorno*, que a veces se hace sentir a distancias inverosímiles. El maremoto de Iquique (Chile), de 1877, a las dieciocho horas repercutió en Nueva Zelanda, destruyendo puentes y averiando embarcaciones, y a las veinticuatro horas se experimentaban sus efectos en la costa oriental del Japón.

Los efectos de los maremotos son catastróficos. El de 1.º de noviembre de 1755 destruyó la ciudad de Lisboa; el de 23 de diciembre de 1834, la ciudad de Simonda (Japón); el de 28 de diciembre de 1908, derruyó por completo la ciudad de Mesina (Sicilia).

### Efectos de los terremotos

Las fuertes sacudidas sísmicas, a pesar de su corta duración, poseen carácter destructor, tanto del medio físico como del medio humano. En la mayoría de los casos, el relieve terrestre afectado por el fenómeno se modifica de manera notable; aparecen grietas, pliegues y fallas que antes no existían, y las aguas superficiales y subterráneas sufren sensibles alteraciones.

Las grietas se producen en terrenos de poca coherencia o en las zonas de contacto entre tierras sueltas

o aluviales y las más compactas; sus dimensiones son variables, alcanzando a veces gran magnitud. En el sismo de Calabria, en 1873, se produjeron grietas de 13 kilómetros de largo; en el de Nueva Zelanda, en 1855, las hubo de 143 kilómetros, y en el de Alaska, en 1899, se formó una grieta de 10 metros de ancho y de gran profundidad.

En cuanto a plegamientos, son citas dignas de mención el temblor de la India en 1897, que produjo unas curvas singulares en el ferrocarril de Calcuta, de las que anteriormente carecía, y el de Mesina, en 1908, cuyas calles quedaron con numerosas ondulaciones como testimonio del paso visible de las ondas por la zona urbanizada de la ciudad.

Las fallas son muy frecuentes en los sismos, y por tanto abundan los hundimientos y elevaciones del terreno sometido a la influencia de las vibraciones. En este punto, es ya clásico el caso del Japón en 1891, en el valle de Midori, en que una carretera recientemente construída apareció con un resalto de seis metros en correspondencia con una falla de 160 kilómetros de longitud y altura máxima de 20 metros. La falla de San Francisco de California, en 1906, alcanzó 600 kilómetros por 6 metros de alto.

En cuanto al medio humano, a medida que la intensidad se aproxima al punto máximo, los resultados van siendo cada vez más trágicos. A cierto grado, los edificios se agrietan en las líneas más débiles o en las zonas de contacto entre diversas clases de materiales de construcción; a mayor empuje, se derrumban los menos resistentes y sufren desperfectos importantes los más sólidos, y al impulso máximo, los pueblos y ciudades quedan reducidos a informes montones de escombros y ruinas. El terremoto del Japón, en 1730, ocasionó 140.000 víctimas; el de Lisboa, en 1755, 60.000; el de Mesina, en 1908, 20.000, y el del Japón, en 1923, costó más de 100.000 vidas y destruyó 370.000 casas en Tokio tan sólo. Basten estos datos para hacerse cargo del cuadro horripilante que debe de ofrecer una de esas grandes poblaciones visitadas por fuertes sacudidas sísmicas.

*Los sismos y la edificación.*—Los sismos han influido de una manera visible en las construcciones urbanas en

aquellas comarcas que reciben con frecuencia el azote de esta clase de fenómenos, siendo este uno de los puntos más interesantes de geología aplicada.

En algunos distritos nipones son abundantes las casas de madera, bambú y caña, cuyos elementos constructivos, por su poco peso, reducen en gran manera los daños de los temblores de tierra, y por su poco coste permiten, en caso de siniestro, una reconstrucción rápida y económica; obsérvese como contraprueba, que este material de construcción no se halla en el Japón y en cambio se encuentra abundante la piedra. Son características en este país las habitaciones humanas de escasa altura y cubierta alabeada, por cuanto la amplitud de la base y la concavidad de los tejados ofrece una mayor resistencia que la superficie plana de otras regiones.

Ha habido países, como el italiano y el japonés, en que se han formulado verdaderos códigos de arquitectura sísmica, con fuerza coercitiva legal, para que sean observadas cuantas medidas se encaminan a conseguir una mayor seguridad en las edificaciones de mampostería y a aminorar los desastrosos efectos de las sacudidas. A este fin, se dispone que una de las diagonales se oriente según la dirección dominante en los sismos, la cual suele coincidir con los accidentes tectónicos próximos de mayor importancia; que los cimientos sean sólidos y profundos, apoyados en terrenos muy compactos, y mejor aún sobre rocas pizarrosas o graníticas; que, en su defecto, se construyan sobre plataformas de cemento; que se empleen materiales muy coherentes, como sillería, ladrillos, hierro, hormigón, unidos con cemento o mortero; que el cuerpo edificado sea más ancho que alto; que las fachadas estén exentas de balcones, cornisas y salientes de toda clase; que las aberturas sean en número reducido; que la cubierta resulte alabeada; que las calles sean de gran amplitud para el libre acceso en caso de aglomeraciones; que las casas se apoyen mutuamente y, a ser posible, que sean de forma y materiales análogos las de una misma manzana.

La finalidad perseguida en este caso es la de procurar un conjunto compacto y homogéneo que se cimbree globalmente en las vibraciones. Para ello los italianos emplean el sistema *baraccato*, que consiste en una armazón de hierro o de madera, articulando paredes y

techos en una sola pieza, y cuyos huecos se llenan luego de materiales adecuados para la construcción.

Como caso destacado de la influencia de los sismos en la arquitectura cabe señalar la basílica de Santa Sofía, de Constantinopla. Situada en una región favorecida por los falconazos de las convulsiones sísmicas, la mencionada catedral se mantiene incólume e intacta a pesar de sus catorce siglos de existencia, de las devastaciones sufridas por la ciudad y de estar asentada sobre caliza terciaria poco compacta con numerosas intercalaciones de arcilla. La resistencia de esa basílica se debe al sistema de construcción en cúpula. Los templos antiguos, en particular los griegos, montados sobre vigas, casi todos han sucumbido ante los temblores terrestres, y sólo se salvaron del desastre unos pocos de amplia base y escasa altura. Los arquitectos llamados por Justiniano para la construcción de Santa Sofía, como procedentes de Asia Menor, región propensa a los terremotos, y por la circunstancia de vivir en una época pródiga en esta clase de fenómenos, conocían de sobras las condiciones similares de la península tracia, y, para prevenirse contra futuras contingencias, se decidieron por la bóveda cerrada y de piedra de una resistencia muy superior a la cubierta de vigas. De ahí la escalonada serie de cúpulas que en progresión decreciente se observan en la citada basílica, apoyándose mutuamente y colaborando en el común sostenimiento. En el siglo VI, en que se edificó la catedral, el Imperio de Oriente estaba en auge, y, por tanto, es lógico que su influencia se proyectara en todas las corrientes culturales de su tiempo, y con la coyuntura de la renovación del arte arquitectónico que se estaba operando, se introdujo y se expansionó el sistema empleado en Santa Sofía.

Así, pues, podemos decir que se debe a los sismos la creación y sucesiva prodigalidad del estilo bizantino en las piezas arquitectónicas de la Edad Medieval.

### Distribución geográfica de los terremotos

Los terremotos no se producen por igual en las distintas partes de nuestro planeta; hay regiones, las *sísmicas*, que se hallan afectadas por las grandes sacudidas o *macrosismos*; otras, las *penisísmicas*, que solamente sufren la acción de las ondas débiles o *micro-*

sismos, y, finalmente, existen países, los *asísmicos*, que están exentos de toda suerte de fenómenos de esta clase.

Los sismos intensos se manifiestan en las tierras que se extienden a lo largo de las grandes fracturas de la corteza terrestre, en los alrededores de las fallas importantes y en los bordes de las altas montañas recientes o vecinas de las profundas fosas oceánicas.

Comprenden dos zonas que se cruzan en ángulo de  $67^\circ$  en la América Central y en las Molucas. El *círculo mediterráneo* o alpino abarca las regiones del Sur de Europa, Norte de Africa, Asia Menor, Himalaya, Molucas, Australia, América Central, Azores y Cabo Verde. El *círculo circumpacífico* se extiende por las costas occidentales de América, Aleutinas, Curiles, Japón, Filipinas y Nueva Zelanda. El cincuenta por ciento de los sismos corresponde a la primera banda, y el cuarenta por ciento a la segunda.

Los países *asísmicos* atañen a los continentes planos, a las grandes llanuras y a los salientes y macizos de muy antigua sedimentación. La mayor parte del África, una gran extensión de Australia, el Brasil y el Norte de América pueden incluirse en el cuadro de tierras definitivamente consolidadas.

### Causas de los terremotos

Para el estudio de las causas, los terremotos se clasifican en locales y generales.

Los sismos locales son en número escaso; de poca extensión y ondas débiles; el movimiento no trasciende más allá del área epicentral; el hipocentro es limitado y poco profundo. Pueden ser provocados por la explosión de gases en la actividad volcánica o por hundimiento de alguna cavidad o caverna de la corteza, producida por el agua subterránea.

Los sismos generales alcanzan mucho espacio y gran intensidad; el área hipocentral se encuentra en las capas profundas de la litosfera, a una profundidad que los sismogramas acusan entre 60 y 120 kilómetros. El noventa por ciento de los sismos pertenecen a este tipo, y se estiman como *fenómenos tectónicos*.

El mecanismo de los sismos se explica por el hundimiento brusco de áreas inestables, de dovelas cortica-

les enteras, cuyo hundimiento origina choques de los bloques entre sí, y cuyas vibraciones, al transmitirse, dan lugar al fenómeno sísmico. Suess admite que estos fenómenos internos no son más que movimientos orogénicos de cordilleras en formación o concomitantes con ella. Por esto los sismos se registran en las zonas de plegamiento reciente, el alpino, en las franjas mediterránea y pacífica.

Hoy es desechada por completo la teoría según la cual todo terremoto debía de tener como antecedente obligado una erupción volcánica; los volcanes, terremotos y maremotos, si bien se manifiestan en las mismas regiones continentales o muy próximas, son fenómenos distintos e independientes entre sí, que pueden coincidir en el espacio y en el tiempo, por tener un origen común y una causa análoga.

## CAPÍTULO VIII

### ACCION DE LA INTEMPERIE

#### II. ACTIVIDAD EXTERIOR DE LA TIERRA

##### Los agentes geológicos destructores

Así que han terminado de actuar las fuerzas internas de la Tierra, volcánicas y orogénicas, creadoras del relieve, o simultáneamente con sus manifestaciones energéticas, empieza la labor del modelado externo que, siguiendo un ritmo evolutivo fatal (*ciclo de erosión*, véase Capítulo III), acabará por destruir los accidentes y desigualdades del terreno.

Prestan su colaboración a este trabajo demoledor las envolturas gaseosa y líquida que se encuentran en contacto inmediato con la superficie de la litosfera terrestre. La forma de actuar de la atmósfera es o bien de una manera pasiva, atacando mecánica o químicamente el roquedo coherente y pulverizándolo, o bien de forma activa con la corrosión que el viento y los materiales que éste arrastra practican sobre los salientes destacados. Pero la fuerza modeladora dominante, por ser la más difundida y la que mayor energía desarrolla, es el agua; hasta tal punto, que la acción por este agente realizada se denomina *normal*. Los otros agentes geológicos destructores: el viento, el hielo y los seres vivos, predominan en zonas más restringidas; el viento, en las regiones desérticas, en donde falta el elemento líquido; el hielo, en las altas montañas o en los países polares; los seres vivos ejercen escasa influencia en el modelado terrestre, ya que la acción geológica principal la desempeñan en el mar.

##### Acción de la intemperie

La consistencia gaseosa atmosférica pudiera dar a primera vista la impresión de casi absoluta inocuidad



ante el roquedo recio y compacto, y, sin embargo, el simple contacto con la atmósfera acaba pulverizando las rocas más coherentes y duras. Esta descomposición que se produce en las rocas expuestas a la intemperie se denomina *meteorización* o simplemente *alteración atmosférica*, y es en realidad la fase inicial y preparatoria de la erosión; la atmósfera prepara los materiales, polvo, arenas, cantos o fragmentos rocosos, que después serán transportados y entrarán en el dominio de los tres agentes denudadores principales: el viento, el agua y el hielo.

La acción de la intemperie sobre el roquedo toma dos aspectos distintos: uno, de orden *químico*, que consiste en alterar los minerales componentes de las rocas reduciendo los más fácilmente atacables a masas pulverulentas (*descomposición química*); otro, de orden *físico* o *mecánico*, que consiste en fragmentar las rocas en partículas o bloques más o menos gruesos y aptos para el transporte (*disgregación mecánica*.)

La descomposición química de las rocas se ejerce por los componentes de la atmósfera en forma muy diversa. Uno de los más activos es el vapor de agua, que en proporción mayor o menor forma siempre parte de ella. El vapor de agua se combina químicamente con muchos minerales coherentes, como la pirita, y los transforma en otros fácilmente deleznable, como la limonita; su acción puede compararse a la hidratación ferrosa que origina la herrumbre en las piezas de hierro expuestas a la intemperie. El anhídrido carbónico del aire toma también parte activa en el trabajo demoledor atmosférico, convirtiendo rocas completamente insolubles e inatacables, como las calizas, en bicarbonatos solubles en el agua, o interviniendo en reacciones químicas más complejas, como la transformación de minerales duros y bien cristalizados, tales la ortosa y demás feldespatos que abundan en el granito, en arcilla pulverulenta. De esta forma, masas rocosas de gran coherencia, como las moles calcáreas, son disueltas por el agua de lluvia y los macizos graníticos pierden su clásica consistencia pétrea. También el oxígeno, aunque en menor escala, transforma muchos minerales en óxidos fácilmente disgregables.

La disgregación mecánica por la intemperie tiene su campo de acción propio en los países cálidos y secos

y en las regiones de climas extremados, en donde los cambios bruscos de temperatura facilitados por la ausencia de manto vegetal protector hace estallar la roca en mil fragmentos. Cuatro procedimientos o mecanismos distintos provocan la disgregación mecánica de las rocas. En primer lugar la dilatación diurna producida por la *insolación* intensa determina la separación de losas (*descamación*), mientras la contracción rápida producida por el enfriamiento nocturno cuarteo las rocas en bloques, de la misma manera que se hace añicos un vaso de cristal calentado que se sumerge bruscamente en agua fría.

Además, las rocas cristalinas de elementos gruesos y colores distintos, se calientan desigualmente; los cristales negros y oscuros, como la mica, más intensamente que los elementos claros, provocan tensiones internas que desmenuzan las rocas cristalinas, como el granito.

El segundo modo de fragmentación mecánica es debido a las *sales* que en los países secos forman eflorescencias sobre las rocas; la humedad o el agua de lluvia las disuelve y de esta forma penetran por las fisuras del roquedo y al cristalizar por evaporación aumentan de volumen y actúan a manera de cuña cuarteando la roca y desmenuzándola. Obedeciendo a un mecanismo análogo, pero mucho más difundido, actúan las *heladas* en las altas montañas y regiones frías; el agua que se infiltra por poros y grietas, al helarse, hace estallar la roca en pedazos. La *deseccación* actúa principalmente en los países pobres en lluvias y en particular sobre las rocas arcillosas, las cuales, al contraerse, se agrietan y fragmentan en polvillo impalpable.

En mayor o menor escala, en todos los climas se realizan ambos procesos destructivos, mecánico y químico, pero en el paisaje destaca muy bien el predominio de uno u otro procedimiento. La descomposición química crea formas suaves y redondeadas, pues la roca viva aparece uniformemente recubierta y protegida por el polvillo fino resultante de la meteorización; en cambio, el continuo martilleo producido por la disgregación mecánica crea cresterías agudas y recortadas, al pie de las cuales se acumulan en escurrideros y escombreras los bloques esquinados resultantes de la fragmentación, formando los llamados *canchales* (*tarteras*,

en catalán). Así, por ejemplo, en la cadena costera catalana, de clima relativamente húmedo y bastante cálido, sus lomas suaves y redondeadas constituyen un buen ejemplo del primer tipo de erosión; mientras las crestas aportilladas de los Pirineos recuerdan la actividad disgregadora de las heladas.

### Formación del suelo

En la alteración del roquedal intervienen activamente, además de la atmósfera, los animales y las plantas. Sus cuerpos y excrementos, al descomponerse, permiten el desarrollo de hongos y bacterias que en sus procesos metabólicos asimilan y destruyen determinadas sustancias y segregan ácidos que atacan las rocas. Las raíces de las plantas y los animales terrícolas remueven y alteran también el suelo, con lo que introducen un importante elemento en la destrucción lenta de los materiales pétreos. En resumen, la meteorización consiste en un proceso físicoquímico, y aun biológico, en el que interviene no sólo la atmósfera sino muy principalmente el mundo vegetal. Todos estos elementos colaboran en la formación del manto pulverulento o *suelo de cultivo* que más o menos desarrollado aparece por doquier.

La naturaleza e intensidad de la intervención vegetal en la formación del suelo dependen del clima. Así la cantidad de *humus* o materia orgánica que entra a formar parte del suelo es muy diferente en una región esteparia, de clima cálido y seco, pobre por tanto en formaciones vegetales y en donde la poca materia orgánica se descompone rápidamente, que en la selva virgen, húmeda y tupida.

Suelo, clima y vegetación forman un nexo estrechamente relacionado en el que cada elemento influye sobre los restantes. El clima, causa primordial, determina la distribución geográfica de los suelos y de la vegetación. A su vez, esta última interviene en la formación del suelo y aun es capaz de modificar ligeramente el clima. Por su parte, el suelo es causa eficiente en la repartición geográfica de las regiones botánicas. La ciencia geológica no puede olvidar estas relaciones, pues tanto el suelo como la vegetación son elementos que influyen en las formas del relieve más intensamente de lo que pudiera parecer a primera vista.

*Clases de suelos.* — La distribución geográfica de los suelos sigue estrechamente las zonas climáticas terrestres. Por eso los suelos varían latitudinalmente, desde las regiones polares frías a los países ecuatoriales cálidos. Recuérdese, por ejemplo, la coloración abigarrada de tonos rojos o rojoamarillentos que predomina en los cuadros de los paisajistas españoles e italianos; por encima de las diferencias de color que impone el roquedo o la vegetación, el tono rojizo de la tierra que lo cubre todo es lo que da personalidad al paisaje mediterráneo. Estos países subtropicales son la patria de las tierras rojas y amarillas, que en la terminología adoptada por la Ciencia del Suelo se conocen con la denominación italiana de *terra rossa*. Son tierras pobres en humus, que deben su origen al predominio de la alteración atmosférica por el anhídrido carbónico.

En las selvas tropicales se encuentra el llamado *suelo de laterita*, formado por una masa de gran espesor de tierras rojizas abigarradas de estructura celular, ricas en hierro, que al secarse se convierten en limonita endurecida. El enorme espesor de este manto de descomposición, que a veces alcanza 50 y más metros, facilita en manera extraordinaria la denudación causada por las lluvias torrenciales. En cambio, en los bosques húmedos y fríos de las regiones templadas, la meteorización avanza más lentamente a causa de las bajas temperaturas y escasean los productos ferruginosos; se forma en ellos el llamado *suelo de cenizas* o *podsol*, de color gris, rico en humus, ácido fosfórico, etc.

En las estepas se pasa de las tierras grises del bosque templado a las tierras pardas y negras o *chernozium*, suelo de color negro, húmifero, sumamente fértil, el cual pierde su riqueza en humus a medida que se acerca al desierto. En éste y en las estepas secas se forma, por evaporación, en la superficie del suelo, una costra endurecida de sales (caliza o yeso) que a manera de costra constituye una corteza protectora contra el arroyamiento.

### Influencia del clima sobre el modelado

Para el observador poco sagaz, el factor esencial del modelado terrestre lo constituye sin duda la distinta dureza y resistencia de las rocas a la erosión. Y en verdad,

en un campo de observación reducido, la distinta coherencia que presentan las rocas compactas y endurecidas, como las calizas, pizarras, granito, conglomerados etc., o las sueltas y deleznable, como las arenas, arcillas y margas, es el factor morfológico dominante en el paisaje. Las primeras forman cantiles, peñascos y salientes destacados, mientras las segundas se deshacen en un modelado de colinas y relieves apenas ondulados. Sin embargo, quien se haya alejado siquiera un poco de su campo de observación cotidiano se dará cuenta en seguida de la inexactitud o de la exageración atribuida a la resistencia pétrea. Quien haya recorrido los países brumosos y húmedos del Norte de la Península Ibérica recordará que, a pesar de la diversidad rocosa (granitos, calizas, pizarras, etc.), dominan formas más suaves y menos enérgicas que en otras regiones de la España árida, en donde las diferencias petrográficas aparecen más acusadas.

Resulta realmente difícil llegar a esta abstracción, pues los caracteres comunes que se observan en una región, por ser precisamente generales, pasan desapercibidos, mientras, en cambio, se aprecian exactamente los matices o las diferencias de detalle. En esto ocurre lo propio que al campesino mediterráneo, por ejemplo, que, al cultivar la vid y el olivo, distingue perfectamente las diferentes variedades de estas plantas y las necesidades de cada cultivo o las condiciones climáticas de humedad, temperatura, etc. que ofrece cada rincón de su comarca, pero en cambio ignora la existencia de una región agrícola caracterizada por estos vegetales.

Es al dejar el marco estrecho de una región climática determinada cuando se perciben las diferencias principales en el modelado y se borra la importancia de los matices accidentales introducidos por el elemento petrográfico. Así, por ejemplo, el yeso, que en un clima cálido y relativamente húmedo, como en España, se disuelve fácilmente u origina formas suaves y apenas destacadas, en Alemania Central, en cambio, resiste perfectamente a la disgregación mecánica por las heladas, formando roquizaes y relieves pronunciados. Un caso más típico y más conocido, a causa de su difusión, es el del granito. Allí donde domina la disgregación mecánica, como en la mayor parte de Europa, el granito resulta ser por antonomasia la roca dura y resistente de

las imágenes literarias. En la región mediterránea, en cambio, en donde predomina la alteración química a causa de la temperatura que acelera la descomposición de sus elementos feldespáticos, se resuelve en una tierra blanca o amarillenta, el lehm granítico, que forma un manto que recubre uniformemente la roca viva, y el paisaje, por consiguiente, es de lomas suaves y redondeadas. Una alteración más intensa todavía se produce en los climas tropicales: regiones graníticas de China parecen enteramente campos de arcillas o margas. El conocido Pan de Azúcar de Río de Janeiro, en nada se parece a las cresterías agudas del Pirineo o a las lomas suaves de la región mediterránea.

### Zonas morfológicas o de paisaje

Se comprende fácilmente, dada la importancia modeladora del clima, que no estando uniformemente repartidas por la superficie del Globo las fuerzas erosivas actuantes, los resultados obtenidos variarán también de unas regiones a otras. De aquí que en cuanto concierne al relieve pueda hablarse de *zonas morfológicas o de paisaje*, exactamente igual que se habla de regiones botánicas o de zonas climatológicas, concepto que ha sido explanado principalmente en diversas publicaciones por el fisiógrafo alemán Sigfrid Passarge.

Siguiendo por este orden de ideas, no sólo puede tratarse de zonas paisajísticas en el sentido morfológico o del relieve, que es el que ahora nos interesa, sino que Passarge llega a establecer una zonalidad paisajística completa con la intervención del factor humano. Los paisajes y actividades humanos, incluso en la libérrima morfología urbana, se sobreponen y encajan exactamente a esta distribución zonar del paisaje fisiográfico. La idea de las zonas de paisaje se sale, pues, del campo geológico y penetra en el dominio geográfico. Con esto se dilata su interés y se extiende su campo de acción. Por las propias razones resultaría difícil exponer brevemente la zonalidad paisajística completa, incluso citándonos al terreno estrictamente geológico. Sin intentar, pues, una descripción detallada, resulta interesante profundizar en este aspecto de la morfología.

Acabamos de ver de qué manera el clima influye directamente sobre el modelado; pero, además de esta

acción directa, su influencia se ejerce indirectamente a través de la vegetación y del suelo. Se comprende que en donde la roca viva esté recubierta por un espeso manto vegetal y un buen mullido de hierba y hojarasca, como ocurre en las regiones de los bosques tropicales, la descomposición atmosférica y el arroyamiento o denudación de los productos resultantes serán muy distintos que en las regiones desérticas o esteparias, donde el agua de lluvia cae directamente sobre el suelo descarnado. Además, en las primeras, la meteorización química, favorecida por la humedad y la temperatura, avanza vertiginosamente y el arroyamiento se verifica no sobre un suelo compacto, sino sobre el manto de materiales sueltos fácilmente arrancados y transportados; por eso los ríos, en estas regiones, se encajan profundamente, pues trabajan en suelo poco coherente. Si el clima cambia y la vegetación desaparece, el arroyamiento se intensifica hasta límites fantásticos; he aquí, pues, cómo no sólo el clima actual, sino incluso el pasado climático, son de valor decisivo para las formas del relieve.

Atendiendo al conjunto de influencias morfológicas, se distinguen cuatro grandes zonas de paisaje: los países de bosque, los de estepa, los desiertos tórridos, y las estepas y desiertos fríos.

En la región de los bosques tropicales ya hemos dicho cómo la humedad, el calor y el caudal fabuloso de los ríos facilitan el arroyamiento, por lo cual éstos pasan encajados entre paredes verticales o muy inclinadas; al propio tiempo, el ahondamiento de los cauces suele ir acompañado de los *argayos* o *deslizamientos* de tierras. La Montaña de Sal, en el Perú, es un ejemplo típico de este modelado, así como lo son las vertientes húmedas de los Andes.

En los países esteparios, el manto vegetal es muy reducido, aunque en la mayoría de los casos ese manto fué precedido de un bosque de secano o matorral arbustivo que el hombre, con las roturaciones agrícolas o las quemadas estivales, ha destruído por completo. Es el caso de las llamadas estepas españolas de la Meseta, de la depresión aragonesa y de la región murciana, en las cuales algunos pies de encina atestiguan su pasado arbóreo. Durante la estación seca, el suelo formado en la fase susodicha se deseca, agrieta y pulveriza; el viento

encuentra materiales que arrastrar y, por tanto, entra en juego la acción eólica, que es nula en la región de bosque. Debido a estas circunstancias, la resistencia y dureza de las rocas adquiere mayor importancia y la erosión permite que resalten mejor las diferencias petrográficas (*erosión diferencial*), poco manifiestas en los países forestales. Además, en las estepas peor irrigadas, el suelo es rico en sales, las cuales contribuyen también a la disgregación rocosa. A veces, las sales cálcicas que el agua disuelve ascienden por capilaridad, determinada por la evaporación continua, hasta la superficie, y cementando cantos y arenas forman un verdadero empedrado o corteza que dificulta la intervención eoliana. En la llanura de Tortosa y en el llamado Desierto de las Palmas de la provincia de Castellón, entre otros, son muy manifiestos estos empedrados calcáreos, abundantes en la España árida.



Fig. 35.—Corte esquemático de cuencas endorreicas. I, Bolsón mejicano; el tamaño de los derrubios disminuye hacia el centro. II, Depresión de Calatayud; la parte en negro representa los depósitos salinos (Brinkmann).

Uno de los caracteres más sobresalientes de estas zonas esteparias es el llamado *endorreísmo*, o sea la falta de avenamiento oceánico a causa del escaso valor del arroyamiento; las aguas de lluvia vierten en lagos salados que durante la estación seca llegan casi a desaparecer. La Mancha, Tierra de Campos (Palencia) y Monnegros (Aragón) son regiones españolas típicamente endorreicas (fig. 35).



Uno de los tipos de relieve que mejor justifica el interés de la morfología comparada de las zonas de paisaje es el llamado de los *montes-islas* (*Insel-bergen* de los alemanes), los cuales consisten en montes o macizos escarpados y de alturas moderadas que destacan bruscamente sobre una llanura, sin que aparezca un tránsito gradual en la pendiente. Su nombre alude a que asemejan islas que destacan sobre el mar de la planicie. Se presentan muy difundidas en Sudamérica, Australia, África, etc. En España se han reconocido diversos ejemplos de montes-islas antiguos en la región esteparia de Murcia y Albacete y en la provincia de Soria. La diferencia de dureza entre las rocas de la llanura y la de los montes no justifica ordinariamente el cambio brusco de pendiente ni el que hayan sido respetadas por la erosión. El hecho de que estos paisajes de montes-islas ocu-



Fig. 36.—Perfil de un monte-isla; la parte en blanco representa los depósitos derrubiados.

pen extensiones enormes en las zonas secas subtropicales, indica la influencia del clima en su formación. Su existencia se debe a que la fuerza erosiva alcanza en estas latitudes mayor intensidad en la base de las colinas, lo cual queda en evidencia por la enorme cantidad de cantos angulosos o *fanglomerados* que se extienden por la planicie que rodea esta clase de accidentes (figura 36).

En los desiertos tórridos, los únicos agentes modeladores son el clima y la resistencia de las rocas; la vegetación no interviene, con lo cual el modelado por el viento alcanza su máximo. El endorreísmo es todavía más acentuado que en la estepa. Los materiales para la denudación son preparados por la desecación, la insolación y la corrosión salina. Según se forme o no costra salina protectora, se distinguen los desiertos de piedra con costra de yeso y los de arena. Pero estos aspectos serán estudiados más detenidamente en el capítulo consagrado a la erosión eólica.

En las estepas y desiertos fríos interviene todavía la

vegetación, pero el papel erosivo máximo lo desempeñan el hielo, la nieve y el agua de fusión primaveral. En estos sitios abundan los suelos pantanosos, en los que el mullido vegetal se descompone lentamente en un suelo rico en materia húmica, que origina turberas (véase capítulo XIII).

Cada zona de paisaje viene, pues, caracterizada por una clase peculiar de erosión, por los productos típicos que ésta origina, por un suelo propio y por determinadas formas de relieve. La zonalidad paisajística resulta simplemente de aplicar el principio geográfico de la extensión a las formas del relieve, siendo uno de los campos más fecundos pero aún casi yermos abiertos a las investigaciones morfológicas.

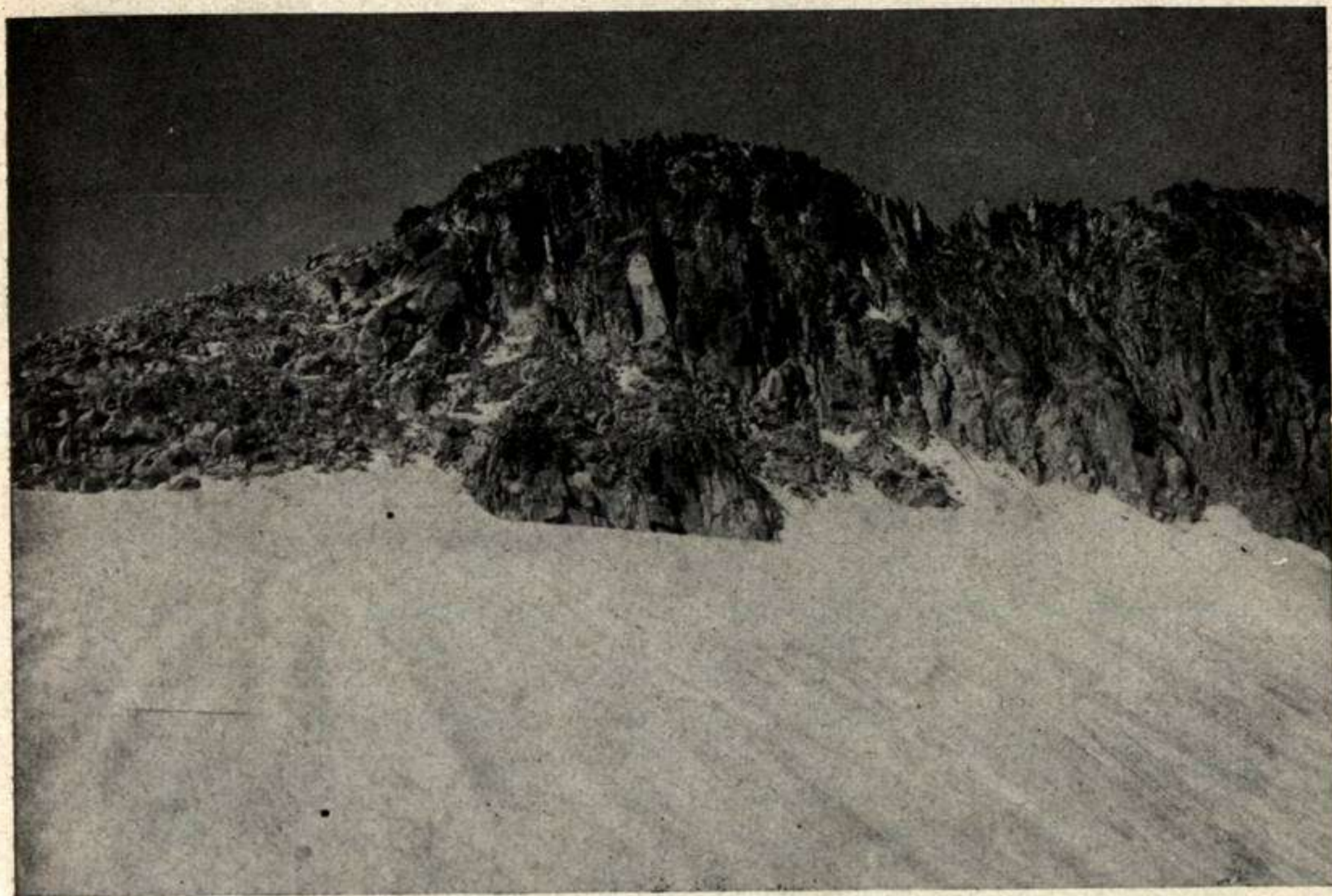


FIG. 1. — Acción erosiva de las heladas en la cima de la Maladeta (Pirineo).  
(Foto. Solé)



FIG. 2. — Erosión de las aguas salvajes en las margas eocénicas de Jaca (Huesca).  
(Foto. Solé)

# LÁMINA X

## ACCIÓN MODELADORA DEL VIENTO



El desierto de arena de Fazzan (Tripolitania); en el fondo de la vaguada, un oasis.  
(Foto. L'Illustration)

## CAPÍTULO IX

### ACCIÓN GEOLÓGICA DEL VIENTO

El aire puesto en movimiento realiza un trabajo erosivo de doble aspecto: mientras por un lado destruye salientes de recia contextura, por otra parte crea nuevas formas del relieve terrestre. En su labor constructora, arranca del suelo los materiales sueltos disgregados por la intemperie y los transporta a distancias varias (*deflacción*) para acumularlos en regiones de relativa calma o en llanuras resguardadas.

En su viaje vertiginoso, lleva en suspensión corpúsculos y arenas de dureza suficiente que al batir contra el roquedo obran como minúsculos arietes o finísimas limas, que desgastan las rocas más resistentes arrancando nuevos materiales que aumentarán el trabajo demolidor del viento. Este fenómeno se designa por *corrosión* y es particularmente visible en las rocas y monumentos de los países desérticos, siendo un ejemplo clásico el que ofrece la Esfinge de Guisé, en Egipto, con las facciones completamente corroídas por el viento.

Como consecuencia de esta labor destructiva, los cantos y piedras sueltos presentan la superficie estriada o acanalada (*yardang*) en la dirección del viento dominante, o a manera de huellas de gusanos o cincelada por radiaciones y oquedades dispuestas irregularmente que dan el aspecto de un conjunto arabesco. Cuando se trata de un saliente rocoso destacado, la corrosión ataca más intensamente las partes bajas, tomando las rocas aisladas la característica figura fungiforme o de seta, por el estilo de la zona desértica del Colorado. En las rocas de consistencia heterogénea ataca las partes blandas y origina una estructura alveolar típica. El propio mecanismo da lugar a la perforación de muros rocosos con la formación de arcos naturales o *foradadas*, formas análogas a las obtenidas en las costas acantiladas con el incesante vaivén del oleaje.

Para que la erosión surta sus efectos es preciso un gran contingente de pequeñísimos derrubios que toleren el transporte por su escasa densidad, y que éstos sean sueltos y sin coherencia alguna entre sí. Esta circunstancia se produce en climas secos o en suelos arenosos, cuyo poder absorbente de la humedad atmosférica deja siempre enjutas las capas superficiales del terreno.

Es interesante examinar cómo se verifica la distribución de los materiales transportados. Sobre éstos actúan dos fuerzas antagónicas: el impulso del viento y la acción de la gravedad. Cuando el movimiento del aire es intenso y supera en energía a su peso, las sustancias detríticas son llevadas a distancias inverosímiles; pero en cuanto decrece el empuje eólico y cede su ventaja a la gravedad, se precipitan al suelo en progresión decreciente respecto del tamaño y peso de los productos errátiles. Primeramente se depositan los más densos y los de mayor calibre; y en áreas sucesivas, las capas van siendo cada vez más finas, hasta que al final únicamente quedan las materias pulverulentas más ténues, las cuales, después de pulular algún tiempo por el aire, se acumulan poco a poco en los confines de la zona encalmada formando mantos de polvo suavísimo y deleznable.

Con los elementos más graves, casi exclusivamente arenosos, se forman las *dunas*, y con los más finos, en que predominan los arcillosos y calcáreos, el *loes*.

### Formación de las dunas

Las dunas son montículos de arena muy fina que forma el viento a lo largo de las playas, en las cercanías de los ríos caudalosos, en las llanuras desérticas exentas de vegetación o en las vecindades de los antiguos glaciares cuaternarios.

Los materiales de las dunas costeras son facilitados por el mar, que con el oleaje y actividad química somete los productos derrubiados a un activo desgaste, hasta disgregarlos en partículas pulverulentas que son arrojadas a la playa y desecadas en la superficie por el calor solar. Las que surgen en las zonas ribereñas se alimentan de los residuos areniscos que se depositan en las márgenes y en las desembocaduras de los ríos, particularmente en el transcurso de las grandes avenidas flu-

viales. En las regiones esteparias y desérticas, la disgregación mecánica impuesta por el clima, y especialmente la labor corrosiva de las aguas salinas, proporciona los elementos terrígenos del suelo árido y seco. En los lugares influidos por las antiguas glaciaciones, los elementos sueltos y de finísimo calibre depositados por los glaciares son fácilmente transportables por los agentes atmosféricos. Las materias detríticas que reciben la acción del impulso eólico alcanzan magnitudes insospechadas; para tener una idea aproximada del trabajo realizado por el viento, puede citarse el caso referido por Fritch, según el cual, del Sahara a las islas Canarias, en el año 1863, se trasladaron 3.944.000 metros cúbicos de polvo, equivalentes a 2.000.000 de metros cúbicos de masa rocosa, lo que supone una montaña cuya base tuviera 180 metros de diámetro y cuya altura fuese de 225 metros.

Cuando cesa la corriente o las arenas voladoras tropiezan con una piedra, una planta, un resto vegetal o un obstáculo cualquiera, con la resistencia que éste opone, una buena cantidad de los detritos se precipitan y quedan abandonados ante el obstáculo, formando los montículos llamados *dunas* (fig. 37).

Las sucesivas aportaciones de las nuevas oleadas pulverulentas aumentan el espesor del minúsculo relieve arenoso y poco a poco surge una pequeña colina *disimétrica*, de pendiente abrupta en el lado opuesto a la dirección del viento dominante, en declive suave la ladera anterior. Esta forma se debe a que los granos de arena que ascienden por el plano inclinado delantero arrastrados por el viento, al llegar a la cúspide de la colina, caen bruscamente en la vertiente opuesta abrigada de las ráfagas de viento por la propia duna. Frecuentemente, los lados de la duna progresan más rápidamente que el centro, por la misma razón de que la parte central más alta hace de pantalla

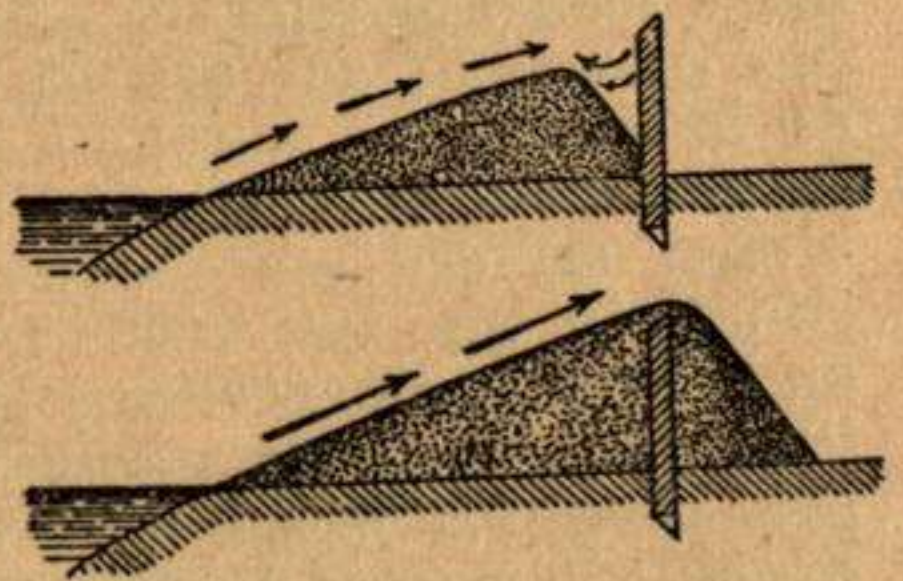


Fig. 37.—Esquema de la formación de una duna; las flechas indican la dirección del viento.

a la parte situada inmediatamente detrás, con lo cual la duna termina lateralmente con dos cuernos arqueados dirigidos hacia atrás; en este caso reciben el nombre de *médanos* o *barjanes*.

Las dunas y barjanes se presentan ordinariamente asociados formando vastas superficies en los desiertos o franjas a lo largo de las costas, unidos unos a otros por sus extremos y dando lugar a los llamados *cordones de dunas*. En estos casos alcanzan dimensiones insospechadas, como en el Sahara, en donde llegan a constituir montañas de trescientos metros de altura a partir de la base de sostenimiento.

Se distinguen las *dunas móviles* o *vivas* y las *fijas* o *muertas*. Las dunas móviles son las que cambian constantemente de lugar, y su desplazamiento se explica fácilmente. Cuando arrecia el viento con alguna fuerza, las capas superficiales de la pendiente suave son arrastradas hacia la cresta de la duna, y una parte de la arena transportada se precipita en la región abrupta. Las olas subsiguientes del vendaval levantan y transportan las arenas de la región delantera de la duna hacia el lado opuesto y así se continúa en el avance hasta cesar la energía eólica. Aunque realizada en etapas parciales, se verifica un aparente progreso general de la duna, que parece ser trasladada en masa, cuando en realidad su traslación se verifica grano a grano. En virtud de ese movimiento se entierran edificios por completo, que más tarde pueden reaparecer al otro lado de la formación arenosa, se invaden campos sembrados, y poblaciones enteras pueden quedar sepultadas (ejemplo, la población griega de Ampurias, en el golfo de Rosas); las dunas constituyen, pues, un serio peligro para el hombre (fig. 38).

En virtud también de ese movimiento cambian constantemente el aspecto y la forma del paisaje en el desierto, de tal manera que resulta del todo imposible para las caravanas que viajan por los mares de arena del desierto encontrar puntos fijos de referencia.

*Fijación de las dunas.* — Ya sea por un proceso evolutivo natural, ya sea por el cambio de clima, ya por la acción del esfuerzo humano, las dunas móviles pueden transformarse en dunas fijas o muertas, que son las que permanecen constantes en el lugar inicial de su emplazamiento y están cubiertas de vegetación.



Ante la amenaza que supone para las poblaciones y los campos cultivados, el hombre se ha esforzado en fijar las arenas voladoras siguiendo para ello una técnica que la práctica ha demostrado ser eficiente.

Para ello se facilita primeramente la formación de una especie de duna artificial, llamada *contraduna*, que se establece en la región delantera del campo de arenas, lo suficientemente elevada para impedir el aporte de nuevos materiales arenosos a la región que se intenta

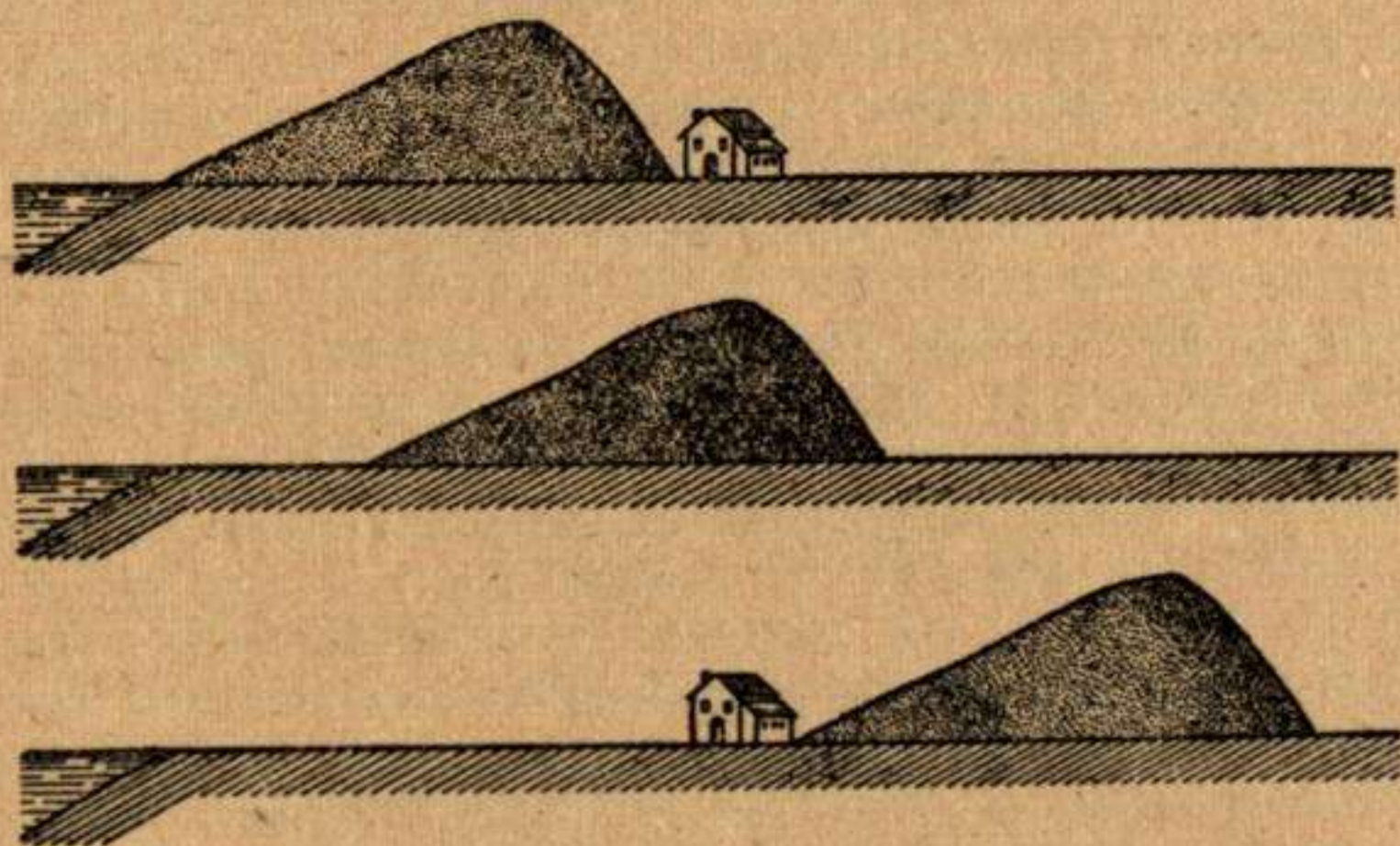


Fig. 38.—Progreso de las dunas (San Miguel).

fijar. La *contraduna* se puede conseguir de dos maneras. Por medio de tablestacas, dispuestas a modo de empalizada, que se insertan en el suelo de modo que sobresalgan lo suficiente para constituir un obstáculo ante el cual se amontona la arena aportada por el viento; la que se escapa por las rendijas se concreta en un pequeño talud al otro lado de la empalizada; cuando el depósito llega casi a cubrir las tablestacas, se levantan éstas por medio de una argolla que llevan en su parte superior, lo suficiente para que constituyan una barrera al viento, y así sucesivamente hasta que la *contraduna* tenga una altura que no pueda ser rebasada por las ráfagas eólicas. También puede provocarse mediante cañizos apoyados por estacas y dispuestos unos sobre otros y a medida que van siendo cubiertos por la acumulación arenosa.

Cuando la contraduna es bastante vigorosa se procede a fijarla por medio de plantaciones de barrón y otras especies vegetales que se desarrollan bien en los suelos arenosos, las cuales extienden sus raíces abundantes y filiformes en busca de la poca humedad que retiene la arena y constituyen una red espesa que impide el desplazamiento del polvo arenoso.

Al mismo tiempo conviene no descuidar la fijación de las dunas situadas detrás de la barrera construída. A este propósito se las cubre con ramaje y tierras arcillosas, o mejor se ponen sendas hileras de barrón, u otras plantas apropiadas, para evitar el levantamiento de los granos de arena; y cuando se ha conseguido cierta estabilidad, se procede a una plantación de pinos, retama u otras especies arbustivas y arbóreas, que las fije de una manera definitiva. Así se han fijado las dunas de la provincia de Huelva (Arenas Gordas) y las de Guardamar, en Alicante, que constituían una seria amenaza para las huertas próximas. De ese modo, no sólo se previenen los perjuicios que se podrían ocasionar, sino que, además, se obtiene un suelo aprovechable para cultivos, de no escaso rendimiento. Véase a título de ejemplo la magnífica transformación operada en el paisaje de las landas gasconas en el Mediodía de Francia, que ha convertido en fertilísimos campos una zona antes estéril y casi completamente deshabitada.

### Loes

Las substancias pulverulentas más tenues, predominantemente arcillosas, que en alas del viento se corren a grandes distancias y a notable altura, quedan suspendidas en el aire durante cierto tiempo, hasta que, poco a poco, se precipitan al suelo, si una lluvia ocasional no acelera su caída. Estas capas de gránulos finísimos, llamadas *loes*, forman vastos mantos de tierra amarilla, suelta y de escasa consistencia, en los bordes de las zonas afectadas por las dunas, en los confines desérticos y en las llanuras esteparias; rellenan los valles más profundos y las depresiones lacustres, sepultan picos, y conforman amplias y uniformes mesetas en altitudes insospechadas.

Entre las formaciones loésicas que revisten interés extraordinario se cuentan las de la China Oriental, ver-

dadera patria del loes, que abarcan 540.000 kilómetros cuadrados, es decir, aproximadamente la superficie de la Península Ibérica, y 170 metros de espesor; los *bolsones* mejicanos, que alcanzan una profundidad máxima de 600 metros; la Pampa argentina, que se extiende desde las altiplanicies bolivianas hasta la Patagonia; las Praderas de Norteamérica, que abrazan un área incalculable; en la Siberia; en las cuencas del Missouri, del Colorado, del Rin, del Po, del Ródano, del Danubio; en Turingia, en Bohemia, en Galitzia, en Polonia y hasta en Rusia, afloran notables sedimentos de loes capaces de llamar la atención del menos experto en materia geológica.

Sorprende en gran manera el encuentro de acumulaciones loésicas de tanta envergadura desde zonas situadas a 3.000 ó 4.000 metros de altitud a regiones costeras, con sedimentos de idéntica estructura y análoga composición y aspecto. Además, al observar su distribución geográfica, se percibe claramente el acantonamiento del loes en determinadas latitudes, lo cual induce ya a sospechar el papel decisivo que el clima debe de ejercer en su formación.

Las teorías que pretenden explicar el origen del loes se basan sobre todo en las observaciones efectuadas en China, en donde estas formaciones adquieren extraordinario desarrollo. Según Richthofen, la parte oriental del antiguo Imperio Celeste estaba ocupada por cuencas endorreicas, en el interior de las cuales había lagos salados en camino de desecación, que tenían a su alrededor vastas zonas desérticas por el estilo de las de Gobi. Los vientos procedentes del desierto aportan grandes masas de polvo que, al depositarse en tierra esteparia, se acumulan al amparo de cada mata a manera de dunas diminutas, que con las lluvias otoñales o de primavera se aglutinan, forman una capa coherente que sirve de soporte a la nueva vegetación esteparia, que a su vez será el punto inicial de nuevas dunas y sucesivos aumentos de espesor del suelo. Así el loes tendría como causas principales el viento y la vegetación y pluviosidad de la estepa, suficiente para fijar el polvo fino y arcilloso procedente de los desiertos cercanos. Es decir, sería una *formación periférica del desierto*, más o menos desarrollada según la dirección de los vientos dominantes (fig. 39).

Según Loczy, el loes necesita para asentarse una vegetación tupida, cosa que no puede ofrecer la estepa. Al decir de este autor, el polvo loésico se sedimenta primero en parajes altos y húmedos y después es arrastrado

por las aguas de lluvia a las partes bajas; su origen sería, pues, *fluvioeólico*.

Bailey Willis, además de la intervención fluvial, recurre a posteriores movimientos de elevación continental para explicar el emplazamiento del loes a grandes alturas.

En el centro de Europa se encuentran también extensas formaciones de loes en parajes completamente apartados del desierto, de forma que no es posible atribuir a aportes de esta naturaleza las masas pul-

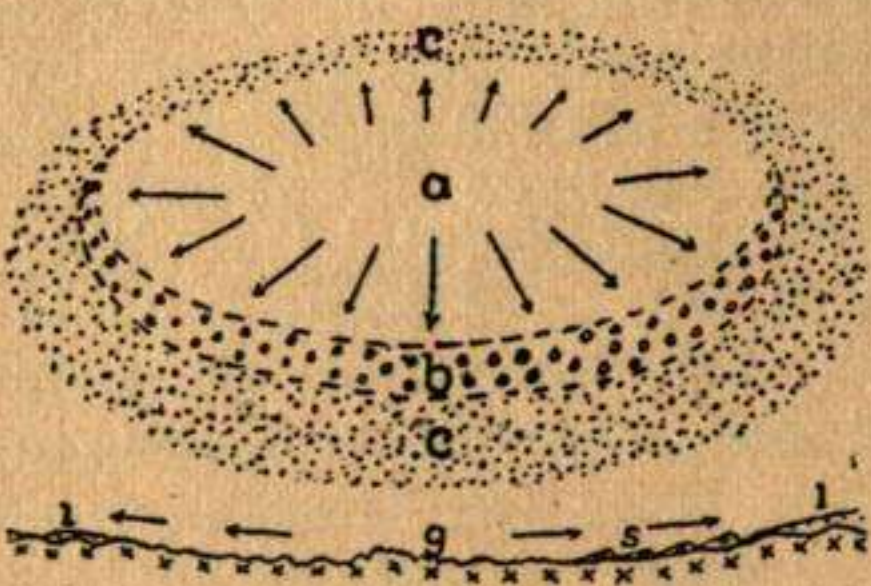


Fig. 39.—Relaciones entre los desiertos y sus aureolas de loes: *a*, región de régimen desértico; *b*, región donde se sedimentan las arenas; *c*, región donde se deposita el loes; *g*, hamada; *s*, erg (Obrutschew).

verulentas arrastradas por el viento. Aquí, y en otras regiones parecidas, el loes procede de los productos de descomposición de los residuos detríticos o *morrenas* (Capítulo XII) depositados por los extensos glaciares que durante la Era Cuaternaria señorearon en las montañas europeas.

El loes es poco coherente, sumamente permeable y muy apto para el cultivo, dando lugar a zonas agrícolas de gran prosperidad, densas de población. En su estructura íntima aparece surcado por numerosos canalillos ramificados que dejan pasar el agua de lluvia hasta el zócalo de la formación, en cuyo fondo se acumula y circula, para ascender a las capas superiores en los períodos de sequía. Forma extensas mesetas profundamente abarrancadas por entalladuras de paredes cortadas a pico, con murallones intermedios, terrazas escalonadas y puentes naturales. Las aguas torrenciales, y aun las pisadas del hombre y de los animales, ahondan rápidamente los caminos y barrancos, que forman un intrincado sistema laberíntico de trincheras abiertas en vasta y uniforme planicie separadas por murallones de escasa anchura.

En resumen, las formaciones de loes son de notable importancia geológica y económica; a ellas son debidas las suspiradas manchas de vegetación alentadora que de vez en cuando aflora en el árido desierto, alrededor del cual forman por contraste una obligada aureola pletórica de vida.

### El desierto

Hasta fecha muy reciente se tenía una noción equivocada del desierto, pues era considerado como una extensa llanura desprovista de toda clase de prominencias.

Estudios posteriores han venido a modificar por completo el concepto clásico, y hoy se entiende como tal toda región de clima extremadamente seco (en los desiertos más áridos llueve por término medio una vez cada cincuenta años), en la que predomina la erosión eólica por encima de todos los otros agentes modeladores del relieve. Ordinariamente carecen de toda clase de vegetación o ésta se reduce a algunas plantas de escasísimo porte y extraordinariamente adaptadas a la sequedad del ambiente. Con frecuencia se hallan surcados por sierras y montañas, las cuales, en algunos casos, como en el Sahara, exceden de los 2.000 metros de altitud. Según que la causa determinante de esta ausencia de vegetación sea el frío o el calor, además de la sequedad, se distinguen los desiertos calidos o tórridos y los fríos o polares. En las zonas de tránsito a regiones mejor irrigadas florece con ocasión de las lluvias estacionales un manto pobre de vegetación xerófila, que se extingue más tarde con la crudeza del invierno o con la sequía estival; es la *estepa*, que por algunos es considerada como un semidesierto o un desierto en formación.

Esta zona morfológica domina grandes extensiones del planeta; en el continente africano sobresalen el incommensurable manto del Sahara y las superficies desérticas de Libia y Argelia; en el Asia, el suelo de Arabia y la meseta de Gobi; la mayor parte del centro de Australia es un inmenso desierto casi virgen; en el continente americano, el desierto de Atacama corre rozando la costa, y los del Colorado, tierras de los Bad-Lands y Arizona ocupan buena parte del centro de Mé-

jico y Sur de los Estados Unidos del Norte de América. En el hemisferio Norte, en Asia y América aparecen bien desarrollados la estepa y desiertos helados, o tierra de *tundras*, nombre con que se designa la vegetación de líquenes y muscíneas.

Ordinariamente se distinguen dos tipos de desiertos: el de piedra y el de arena.

En el *hamada* o desierto de piedra, el agua, al evaporarse, forma una costra caliza o yesosa protectora del suelo. El aspecto del paisaje es en estas condiciones el de un pedregal estéril y salvaje, mucho menos hospitalario que el desierto de arena, pues es inútil buscar en él oasis en donde refugiarse. El desierto de Gobi, en Asia Central, es un ejemplo típico de hamada. La acción modeladora del viento reviste aquí menor intensidad, pues únicamente puede actuar cuando la insolación rompe la delicada corteza salina y entonces el suelo pulverulento de debajo puede ser transportado. Por esto es frecuente encontrar aquí restos de valles fluviales completamente secos, los *uad* de los árabes.

En el *erg* o desierto de arena, la acción eólica alcanza gran intensidad; el terreno presenta el aspecto de una superficie ondulada por las dunas, que en sendas alineaciones se esparcen por todas partes. Un gran sector del Sahara ofrece este aspecto. En el erg, las aguas fluviales se escurren rápidamente a través del manto arenoso, se depositan o circulan a poca profundidad siguiendo los antiguos valles, sepultan las arenas y alimentan pozos y fuentes y manchas de lozana vegetación, los *oasis*, que rompen la fatigosa uniformidad del suelo.

En el desierto se creía ver el vestigio de antiguos mares que fueron desecándose en el transcurso de los siglos. Hoy queda fuera de dudas que el factor esencial en la formación de los desiertos es el clima; cualquier terreno puede considerarse potencialmente desértico si las condiciones climatológicas son favorables. Por eso vemos los desiertos y las estepas localizados sistemáticamente en las latitudes medias de la Tierra, correspondientes a las regiones de extremada sequía, o en las zonas polares de caracteres análogos.



El desierto de piedra de Egipto, entre el Nilo y el oasis de Khargeh. Las ramblas señalan el escaso desarrollo de la red hidrográfica.

(Foto. L'illustration)



FIG. 1. — Las tierras amarillas del norte de China. El manto de loes escalonado en terrazas de cultivo. (De la Geografía Vidal la Blache)



Instituto San Isidro de Madrid 2016 **FIG. 2. — Meandros del río Tarra, en Colombia.** (Foto. The National Geographic Magazine)



## CAPÍTULO X

### ACCIÓN GEOLÓGICA DEL AGUA

La acción geológica del agua reviste carácter universal. Aun los mismos desiertos y regiones polares apenas si escapan de su actividad modeladora, y, en último término, sus productos de erosión acaban casi siempre por entrar en el dominio acuoso, para ser finalmente transportados hasta el mar. Por esto recibe el nombre de *erosión normal* la labor realizada por el agua.

El trabajo demoledor de este agente se manifiesta principalmente en las *aguas encauzadas* en ríos y torrentes, las cuales ahondan los lechos por donde transcurren, y transportan hasta la desembocadura los materiales arrancados. Sin embargo, antes de llegar a esta eclosión, el agua de lluvia que cae incesantemente sobre el roquedo escurriéndose por las laderas de las montañas sin llegar a formar cauces formalizados (*aguas salvajes*), realiza también una importante labor modeladora, y debe tenerse en cuenta asimismo la denudación practicada por las aguas que, penetrando por las finas hendiduras de las rocas, circulan por el interior de la corteza terrestre (*aguas subterráneas*).

#### Aguas salvajes

Al caer el agua de lluvia, se desliza por las pendientes y flancos de las montañas realizando una importante labor denudadora que se conoce por *arroyamiento* («*ruisselement*» en francés) y cuya intensidad depende en gran parte de la resistencia de las rocas que encuentra a su paso.

Si éstas son solubles, tales como el yeso, la sal o las calizas, los hilillos de agua que forman una cortina sobre las pendientes excavan, por disolución, surcos estrechos, paralelos entre sí, separados por crestones

agudos a modo de cuchillas. Estas formas esculturales, que hacen penosa la marcha a través de los macizos constituidos por materiales de dicha naturaleza, reciben el nombre de *lapies* (franc.) o *lenar* (*karren* por los alemanes). En la Montaña de la Sal, en Cardona (Cataluña), y en general en todos los macizos calcáreos (Mallorca, Garraf, Torcal de Antequera, etc., también en España), constituyen formas muy características.

Otra cosa muy distinta sucede en las rocas arcillosas y margosas de escasa coherencia. Los materiales sueltos y fácilmente disgregables son arrastrados por las aguas salvajes, las cuales forman regueros y surcos (*calanchi*, del italiano) que se ensanchan y ahondan rápidamente, contribuyendo a la formación de las barrancadas. En los países privados de la protección de un manto vegetal tupido, este paisaje de tierras arcillosas profundamente abarrancadas reviste caracteres particulares por su extensión e intensidad, recibiendo la denominación de *bad-lands*, tomada de la región de igual nombre de los Estados Unidos del Norte de América. Cuando las arcillas aparecen recubiertas o mezcladas con bloques de piedra, éstos defienden a las tierras blandas que están debajo, mientras la zona adyacente es rápidamente arroyada; en virtud de este proceso, al final queda una pirámide de tierra blanda cubierta por un bloque de piedra que la protege; por su aspecto estas formas son llamadas *dame-coiffé* por los franceses.

En las rocas duras y coherentes, los efectos de la erosión por las aguas salvajes revisten características muy distintas que dependen de su naturaleza y de la llamada *disyunción*, propiedad que presentan todas las rocas de dejarse partir o exfoliar según planos de mínima resistencia, que vienen señalados por fisuras casi invisibles o *diaclasas*. La dirección de los planos de exfoliación varía con los distintos tipos de roca. En las eruptivas, los planos de disyunción se forman al contraerse y consolidarse el magma por enfriamiento, mientras en las sedimentarias el agrietamiento nace por desecación lenta, tal como ocurre en las tierras arcillosas expuestas al sol. En las primeras, los planos de exfoliación suelen delimitar formas cúbicas, cuyos vértices salientes son energicamente corroídos por la intemperie, que los convierte en formas esféricas (*disyunción bolar*); en el granito, por ejemplo, son muy

típicos los acúmulos de bloques redondeados o *caos graníticos* originados de esta manera. En las rocas basálticas y, en general, en las volcánicas que se han enfriado en contacto con la atmósfera, la disyunción determina formas *prismáticas*.

En las rocas sedimentarias coherentes, las diaclasas pueden determinar formas cúbicas paralelepípedicas, o en losas, según el espesor del estrato. Las formas resultantes varían con la mayor o menor facilidad con que las aguas salvajes atacan los salientes y circulan por las grietas, originándose formas diversas de erosión, como la *montserratina* en los conglomerados de cemento calcáreo.

### Ríos y Torrentes

El arroyamiento producido por las aguas salvajes origina surcos profundos y barrancos por los que bien pronto circulan cursos de agua regulares y organizados: los *torrentes* y los *ríos*, los cuales sólo difieren en la longitud y en el caudal, periódico e irregular en los primeros, constante en los segundos. Pero, en lo demás, unas mismas leyes rigen a unos y a otros, y ambos realizan una intensa labor erosiva; el agua encauzada, poseída de gran fuerza viva que varía con el caudal y la velocidad, ahonda rápidamente el cauce por donde transcurre, tanto por la acción denudadora que realiza directamente, como por la energía y la fuerza erosiva desarrollada por los materiales, bloques, cantos rodados y arenas, que arrastra y restriega contra el suelo, arrancando nuevos fragmentos rocosos que a su vez aumentan la potencialidad demoledora de las aguas.

Las leyes, nada sencillas a veces, que rigen el modelado fluvial, nos son bien conocidas, lo mismo que la potencialidad erosiva de las aguas corrientes; nada puede hacernos dudar acerca del origen de estas profundas entalladuras como las del Cañón del Colorado y otras parecidas, que alcanzan profundidades que rebasan varios centenares de metros. «Estudiando los torrentes de los Alpes, el ingeniero Surell reconoció en el año 1840 las leyes más importantes. En la montaña, la Naturaleza nos ha proporcionado campos grandiosos de experimentación; las formas cambian tan rápida-

mente que es suficiente la vida humana para apreciar su evolución. A un observador atento no puede causar ninguna extrañeza la profundidad de los valles, ni tiene necesidad de ver en las gargantas la obra de fuerzas misteriosas, fallas o dislocaciones de la corteza terrestre; tenemos ante nuestra vista el agente con cuyo trabajo infatigable se han excavado lentamente los valles, le vemos actuar y a veces las catástrofes nos recuerdan lo que es capaz de hacer.» (MARTONNE.)

La potencia erosiva del agua no es igual en todas las partes del curso; su distinta manera de actuar se aprecia muy bien y de un solo vistazo en los torrentes, en los cuales, atendiendo a estas circunstancias, se distinguen tres regiones: la *cuenca de recepción*, el *thalweg* (camino del agua, en alemán) o *canal de desagüe* y el *cono de deyección*. La cuenca de recepción es la zona superior del torrente en donde se recogen las aguas salvajes y en donde actúa intensamente el arroyamiento; por esto tiene forma de embudo. En el cauce o canal de desagüe, el agua ya regularizada verifica una intensa excavación lineal y al propio tiempo transporta los materiales arrancados en la parte alta. Los productos derrubidos se acumulan a la salida del canal de desagüe formando un montón que se llama *cono de deyección*. Éste, por tanto, no es más que el molde que rellenaría y encajaría perfectamente en el vaciado practicado en la cuenca de recepción. Así, pues, en el curso superior predomina el arroyamiento; en el canal de desagüe el transporte tiene ventaja sobre la denudación y la sedimentación, y en la parte inferior predomina casi exclusivamente la acumulación (fig. 40).

En los ríos se distinguen también estas tres zonas, que aquí, por su desarrollo, se denominan *curso superior*, *medio e inferior*.

Las aguas corrientes, como cualquier agente erosivo, se crean sus propias resistencias, en virtud de las cuales su acción erosiva tiende a un límite, alcanzado el cual pierde su poder demoledor. Una vez más, pues, encontramos el ritmo vital en el desarrollo de las energías terrestres; por eso puede hablarse con toda propiedad de juventud, madurez y senectud de los ríos, según su estado evolutivo diste más o menos de la fase final, en la que ya son incapaces de provocar modificaciones

en el modelado de la superficie. Este proceso evolutivo de la red fluvial, es el principio básico de la erosión llamada normal; veamos, pues, en qué consiste.

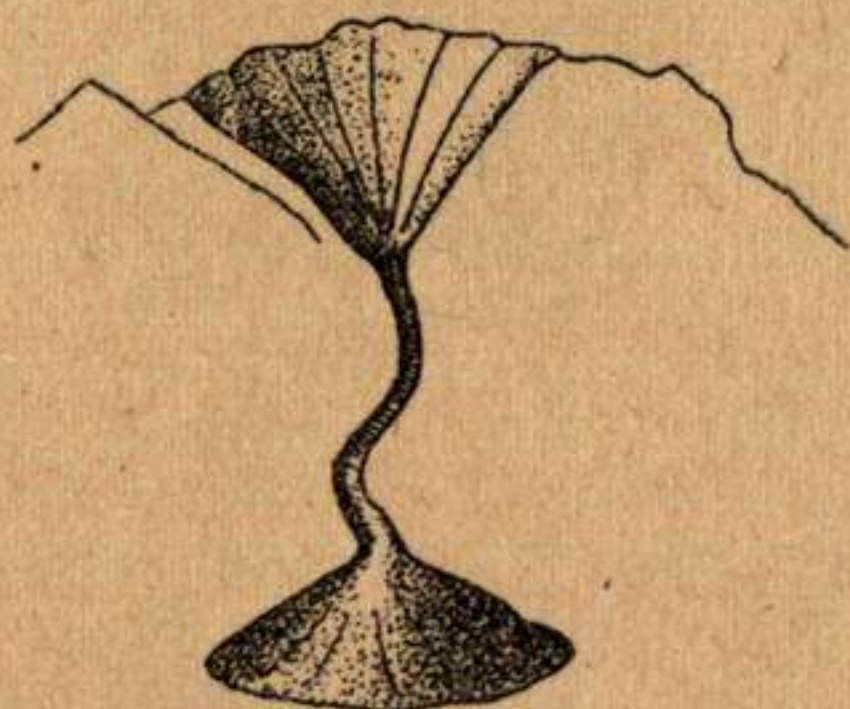


Fig. 40.—Esquema de un torrente.

*Perfil de equilibrio.*—La longitud más corta entre dos puntos *A* y *B* (fig. 41) es sabido que viene representada por la línea recta. Pero, en cambio, no es éste el camino más rápido si entre los dos puntos expresados

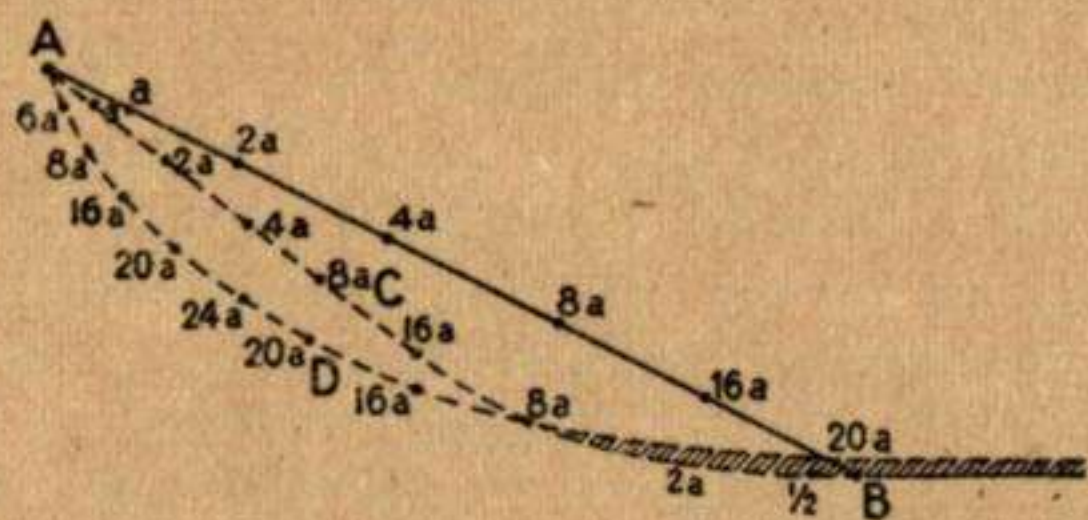


Fig. 41.—Formación del perfil longitudinal de un río (Passarge). Los números sólo dan una idea de las proporciones que guardan las distintas velocidades. La zona rayada indica los depósitos de derrubios.

existe una diferencia de nivel; en este caso, lo sería el camino curvo *A D B*, pues el móvil que partiera de *A* adquiriría en la primera parte de su recorrido una aceleración tal que le permitiría recorrer en menos tiempo

una longitud mayor. Esta curva de máxima velocidad que los matemáticos designan con el nombre de *dromocrónica*, es parecida a la *hipérbola* y es la forma más aproximada a la que presenta el perfil longitudinal de los ríos; pudiéramos decir, pues, que las aguas, en su marcha, realizan el mínimo esfuerzo, buscando el camino más rápido para llegar al mar.

El mecanismo en virtud del cual se llega a este trazado del perfil longitudinal de los ríos es fácil de comprender. En el curso primitivo  $AB$ , la velocidad ( $a$ ) aumenta según la aceleración impuesta por la gravedad,  $2a$ ,  $4a$ ,  $8a$ ...; como al propio tiempo aumenta la masa o caudal por las continuas afluencias, la máxima potencia erosiva crece aguas abajo del curso y alcanza su máximo en la parte baja próxima a la desembocadura o *nivel de base*, punto por debajo del cual la erosión es nula. Por consiguiente, el punto  $B$  retrocede más rápidamente que su inmediato superior, y así sucesivamente, con lo cual se excava un nuevo cauce  $ACB$ . En éste, la máxima velocidad es alcanzada en  $16a$ ; después disminuye con la pendiente suave del nuevo curso, con lo que comienza el depósito de los materiales arrancados a las zonas superiores (rayado en la fig. 41). Por la misma causa, el punto  $C$  retrocede a su vez y se forma un nuevo perfil, en el cual el máximo erosivo se encuentra en  $D$ ; sigue, pues, desplazándose aguas arriba el máximo poder erosivo (*erosión ascendente o regresiva*), al propio tiempo que el manto de derrubios crece y se alarga en el mismo sentido. Finalmente, siguiendo este proceso, se forma un perfil longitudinal cóncavo parecido a una rama de hipérbola o a la curva dromocrónica; entonces ya no hay más erosión en la parte superior, ni sedimentación en la inferior; el río ha alcanzado su fase de equilibrio, o, lo que es lo mismo, se encuentra en plena senectud.

*Excavación del cauce y modelado de las vertientes.* — Las aguas fluviales, en su movimiento de traslación, actúan como sierra potentísima, a la vez que el movimiento giratorio de los torbellinos produce el efecto de una taladradora o perforadora. Así, por ese doble juego, se han excavado hondos valles como los cañones americanos y los espléndidos desfiladeros y congostos que atraviesan la cordillera cantábrica (río Deva, etc.) o las gigantescas gargantas de Collegats, Terradets, Seira,

etcétera, en los Pirineos, cuyas paredes verticales no es raro alcancen centenares de metros de altitud.

Como testimonio de la acción perforante, se encuentran en los cauces las llamadas *ollas*, *cárcavas* y *marmitas torrenciales*, pozos o concavidades de escasa profundidad en cuya formación han intervenido eficazmente cantos y arenas que en su movimiento giratorio han producido la excavación. Cuando los remolinos son próximos, las *cárcavas*, separadas solamente por tabiques delgados, acaban fusionándose y constituyendo un canal o cauce angosto festoneado en el que las concavidades y convexidades de cada orilla se corresponden con las de la orilla opuesta.

Como el cauce del río no es homogéneo, sino que ordinariamente se excava en terrenos de resistencia muy diversa, los blandos y poco coherentes son desgastados con rapidez, mientras que los duros y compactos resisten más tiempo; éstos originan un saliente o ruptura de pendiente en el cauce, el cual forma una *cascada*, si el desnivel es brusco y el río lo salva de una vez, y un *rápido* o *raudal*, cuando el cambio de pendiente afecta a una zona más o menos larga, que el río salva escumeando por las rocas que afloran entre las aguas. Pero todos estos accidentes son de vida limitada, y el mismo trabajo demoledor del río acabará destruyéndolos. En las cascadas, la gran fuerza viva desarrollada por el agua al romper sobre el suelo desde cierta altura produce un socavón, o *marmita de gigante*, muy característico, que acaba provocando el hundimiento de la techumbre y el retroceso del frente de la cascada, con lo cual disminuyen el salto y la fuerza erosiva; poco a poco, la cascada retrocede y va siendo substituída por un rápido (fig. 42). Un ejemplo bien conocido de retroceso de cascadas nos lo ofrecen las célebres del Niágara, cuya marcha hacia el lago Erie se evalúa en 1'64 metros por año.

El río no se limita a ahondar solamente en sentido vertical a manera de sierra, sino que, además, ataca las paredes laterales. Tan inestables como el mismo cauce son las vertientes, las cuales se ven corroídas por el arroyamiento y la denudación operada en los pequeños torrentes que afluyen a la arteria principal. La forma de las vertientes depende en gran parte de su constitución. Si se trata de rocas resistentes, como las

calizas, conglomerados, etc., la erosión lateral es demasiado débil para hacerse sentir intensamente y por eso predomina la erosión linear; el *thalweg* se hunde entre cantiles escarpados en las angosturas de los valles. Cuando alternan en capas horizontales o poco inclinadas las rocas duras y las blandas, producen una característica gradería, cuyos rellanos se desarrollan a expensas de las tierras blandas. Si se trata de rocas arcillosas o margosas, la erosión lateral sigue el mismo

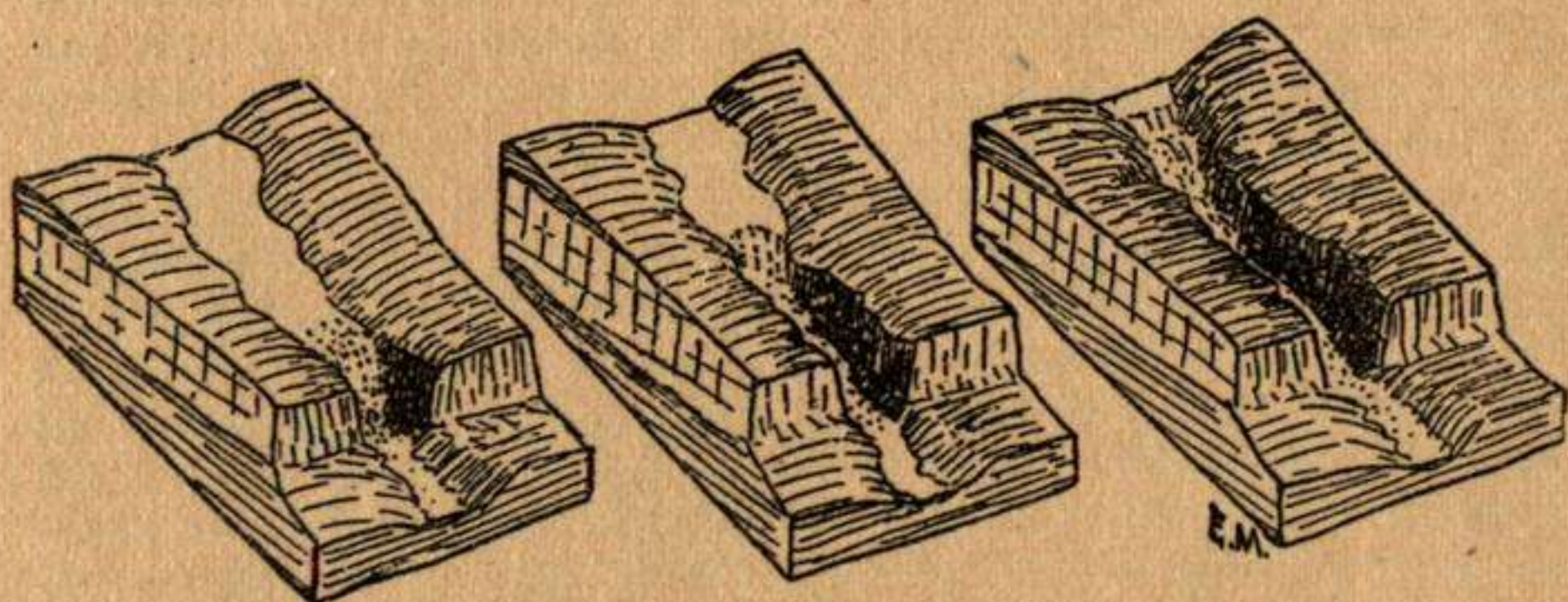


Fig. 42.—Transformación de una cascada en rápido (Martonne).

ritmo acelerado que la longitudinal; las vertientes retroceden progresivamente, al mismo tiempo que disminuye su pendiente; el río, entonces, puede desarrollarse ampliamente, y si lleva escasa velocidad empieza a describir circunvoluciones o *meandros* (nombre tomado del río Meander, Asia Menor), los cuales no divagan al azar, sino que, al igual que los menores accidentes del modelado fluvial, obedecen a unas leyes rectoras.

*Evolución de los meandros.* — Cuando el río describe un curso sinuoso, el agua no desarrolla igual actividad denudadora en ambas orillas, sino que ataca con mayor intensidad la ribera cóncava enfrentada con la corriente, la cual es socavada, y sus paredes verticales se ven obligadas a retroceder tan aceleradamente en poco tiempo, que es suficiente una vida humana para poder apreciar la variación del curso fluvial. En cambio, en la orilla opuesta, convexa, se depositan cantos, arenas, etc. que arrastra el río, con lo cual se forma un declive suave constituido por derrubios. Como este ata-



que alternativo tiene lugar en cada meandro, el río tiende a exagerar hasta cierto límite la longitud y sinuosidad del curso.

La amplitud de los meandros está en relación directa con la potencia del río, la cual viene indicada por la anchura del cauce. El valor de esta relación en todos los ríos que se ha estudiado (Rin, Danubio, etc.), se ha encontrado que es igual a 1:18; es decir, que el *lecho de los meandros*, o sea la amplitud de la zona limitada por dos líneas paralelas y tangentes a las orillas cóncavas alternantes, es 18 veces mayor que el lecho del río. Según eso, cuanto más caudaloso sea un curso fluvial tanto mayor será el desarrollo de sus meandros. De aquí se deduce que, en un determinado segmento de un río, todos los meandros alcanzan al final de su evolución la misma amplitud; también se deduce de esta ley que los meandros estarán más desarrollados en el curso inferior que en el superior (fig. 43).

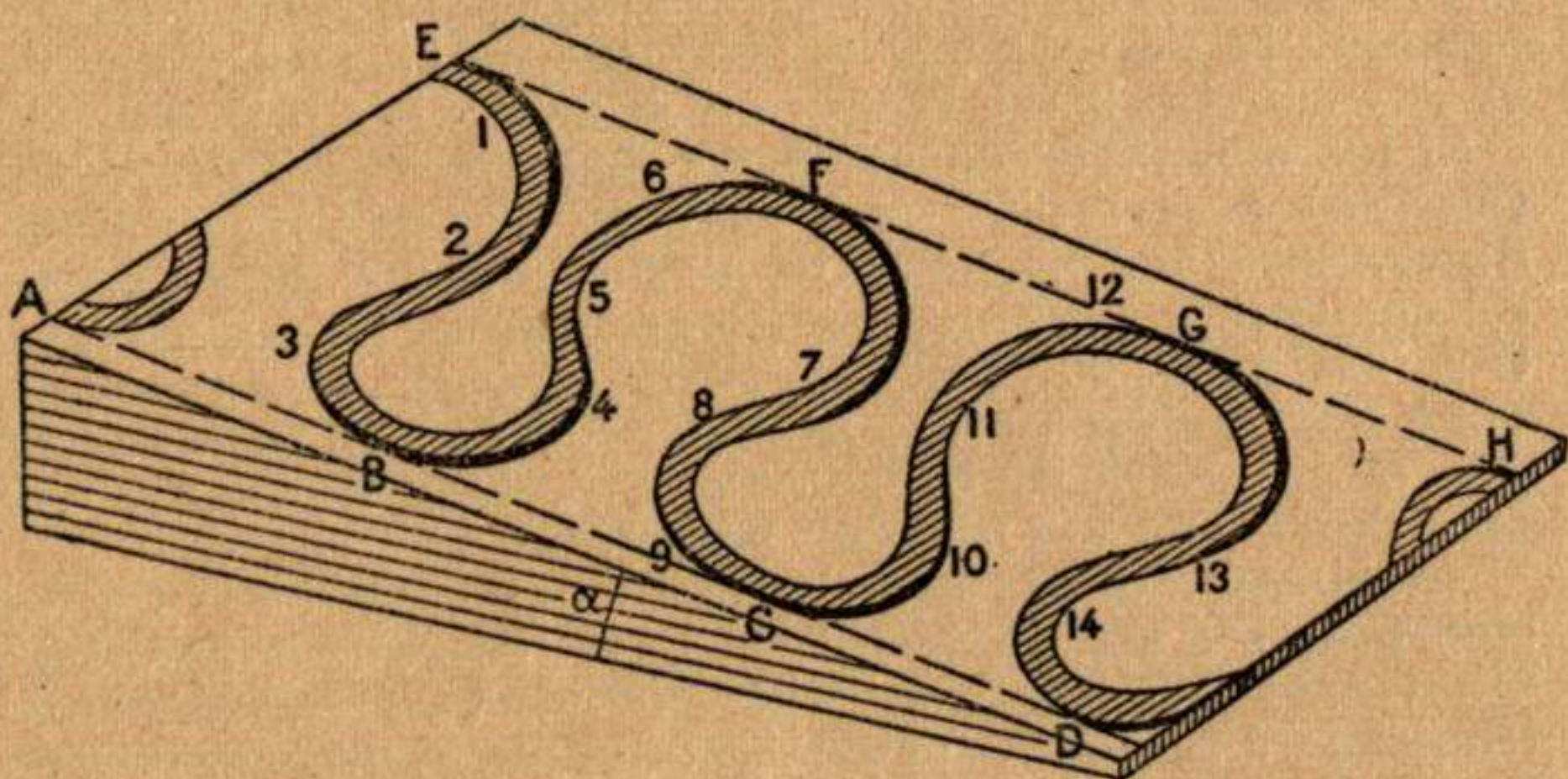


Fig. 43.—Ley de evolución de los meandros (Martonne). A B D y E F H señalan la amplitud del lecho de los meandros. La ribera cóncava excavada está indicada en trazo grueso (1-2, 3-4, 6-7, 9-10, 12-13). En la ribera convexa, señalada con trazo delgado (2-3, 5-6, 7-8, 11-12, 13-14), el río corre en dirección contraria a la pendiente del curso general.

Otro hecho bien comprobado es el desplazamiento gradual de los meandros aguas abajo del río. En su proceso evolutivo, los meandros, no solamente am-

plian su longitud hasta el límite fijado por la ley acabada de exponer, sino que, simultáneamente con su expansión lateral, los meandros caminan hacia la desembocadura. Este desplazamiento se explica por la *disimetría* que forzosamente deben tener las sinuosidades del río; aunque en un momento dado se alcance la simetría, ésta no puede ser estable, a causa de que, en una parte de la curva, el agua se ve impelida a correr en sentido contrario a la pendiente de la llanura; en estas condiciones, la sección inferior del arco cóncavo de cada meandro se ve atacada con mayor violencia que la parte superior del mismo; la primera retrocederá más de prisa, mientras en la segunda empezará a actuar la sedimentación. En el Missisipi, en un período de veinticinco años, los meandros han corrido unos 600 metros. Otras veces, el desarrollo rápido de la mitad inferior del arco produce la fusión de dos meandros consecutivos, con la estrangulación de una porción de tierra que forma una isla central. A veces, este juego de la erosión ha acarreado consecuencias políticas al hacer cambiar la pertenencia de algunas poblaciones cuando el río constituía la frontera delimitatoria (fig. 44).

Si los meandros pasan *encajados* (*hoces* se llaman en Castilla), su evolución es más lenta que en los meandros divagantes, pero obedecen a los mismos principios; únicamente cabe tener en cuenta que el proceso evolutivo suele desembocar en la formación de un ancho valle desproporcionado al caudal del río y constituido por una llanura de derrubios entre laderas en escarpa excavadas por los propios meandros.

*Sedimentación fluvial.* — En el curso inferior de los ríos y en los remansos de las corrientes, en donde disminuye la velocidad, se depositan los derrubios arrastrados por las aguas. Estos sedimentos son *bloques* de mayor o menor tamaño, *grava* y *cantos rodados*, cuyos ángulos esquinados se han ido limando con el roce continuo entre ellos y con las paredes del cauce. A su vez, este trabajo demoledor origina productos más finos, resultantes de la molienda: *arenas* y *arcilla*. Todos estos sedimentos de origen fluvial reciben el nombre de *aluviones*, y de *aluviales* las formaciones sedimentarias que a sus expensas se forman en las orillas del cauce o en la desembocadura.

Es un hecho fácil de observar que los derrubios no

se encuentran uniformemente repartidos por todo el curso; en la parte superior, las aguas poseen, a causa de la pronunciada pendiente, potencia suficiente para arrastrar grandes bloques, mientras que en el curso medio la velocidad de las aguas permite ya solamente el transporte de aluviones de mediano tamaño, y, final-

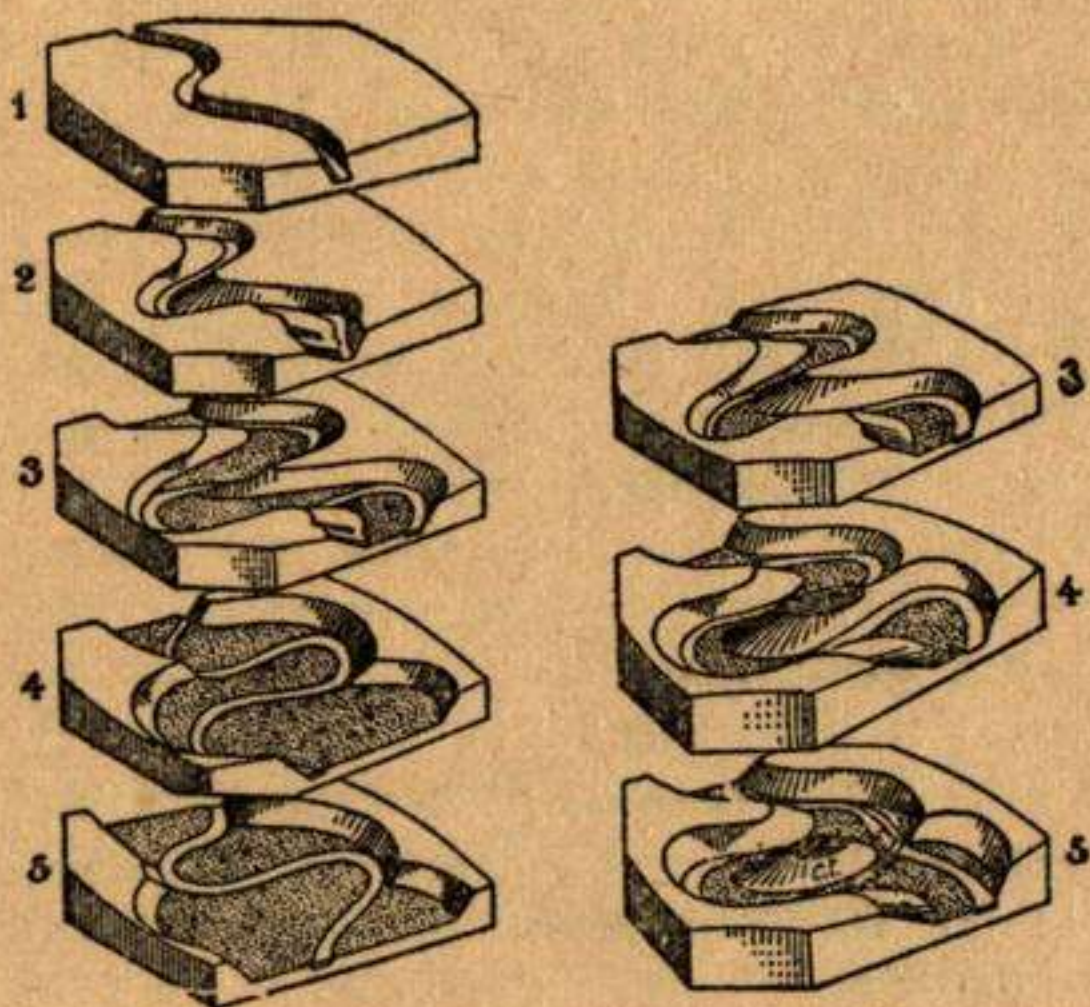


Fig. 44.—Evolución de los meandros (Davis). 1-3-5, desplazamiento de los meandros y ensanchamiento del valle. 3-5, estrangulamiento de un meandro y aislamiento de un cerro testigo (ct).

mente, sólo llegan al curso inferior y a la desembocadura los materiales más finos, procedentes de la molituración de los materiales gruesos de los cursos medio y superior.

Cuando el cauce del río es ancho y de escasa pendiente, los aluviones procedentes de la parte alta del curso se depositan formando *bancos aluviales* a modo de islas triangulares, con el vértice dirigido aguas abajo; estos islotes van siendo atacados por la parte posterior, que recibe de pleno el embate de la corriente, mientras progresa su punta anterior con los aportes procedentes de aquélla; así, lentamente, la isla avanza en el sentido de la corriente.

*Terrazas.* — Los depósitos aluviales abandonados en las riberas suelen tener mucho mayor desarrollo y llegan a formar amplias llanuras aluviales, que se inundan solamente en las grandes avenidas, formando el llamado *lecho mayor* del río. Estos depósitos pierden contacto con las aguas del río a medida que éste realiza su trabajo de excavación, y si el ahondamiento del *thalweg* reviste cierta importancia, a los lados de la corriente y a cierta altura sobre ésta queda una capa de depósitos aluviales indicadora del antiguo cauce del río, de los cuales se dice que forman una *terraza*.

En la mayoría de los ríos se observan en sus vertientes rellanos, situados a veces a más de 100 metros sobre el cauce actual, con mantos de grava, arenas o arcillas, que demuestran que después de su sedimentación el valle ha sido profundamente excavado. El origen y desarrollo de las terrazas fluviales, así como de las marinas (Capítulo XI) es un fenómeno de extraordinario interés para los geólogos, los cuales han visto en ellos la posibilidad de descubrir la evolución de los valles actuales, un fiel seguro que acusa el sentido de los movimientos epirogénicos e incluso un procedimiento capaz de discernir la mecánica de tales movimientos de la corteza terrestre.

En la actualidad comienzan a ser bien conocidas las terrazas de los principales ríos europeos y americanos; pero las conclusiones a que han llegado los investigadores acerca del origen del terrazamiento fluvial son divergentes, pudiendo reunirse en tres grupos distintos.

Después de los clásicos estudios de Penck sobre los ríos alpinos, fué tendencia general el atribuir el fenómeno del terrazamiento a los cambios climáticos ocurridos durante la Era Cuaternaria. Penck observó que los ríos de la vertiente Norte de los Alpes presentan cuatro niveles de terrazas, cada uno de los cuales se enlaza con sedimentos depositados por los glaciares cuaternarios. Se comprende que, a causa del enfriamiento acaecido en cada período glacial, el caudal de los ríos debió de disminuir, y, por consiguiente, que sería también menor su fuerza erosiva y la sedimentación predominaría sobre la excavación; es la época de sedimentación de las terrazas en forma de llanuras aluviales. En los períodos interglaciares, el caudal de los ríos se incrementó con la fusión de los hielos acumulados en la fase an-

terior; al aumentar la potencia fluvial, el río ahondaría el cauce, con lo cual la terraza formada ganaría altura sobre el nivel de las aguas. La repetición del ritmo excavación interglaciar, sedimentación glaciaria, daría lugar a la formación de los cuatro niveles de terrazas correspondientes a los cuatro periodos glaciares del Cuaternario (fig. 45). Por esto, a este género de forma-

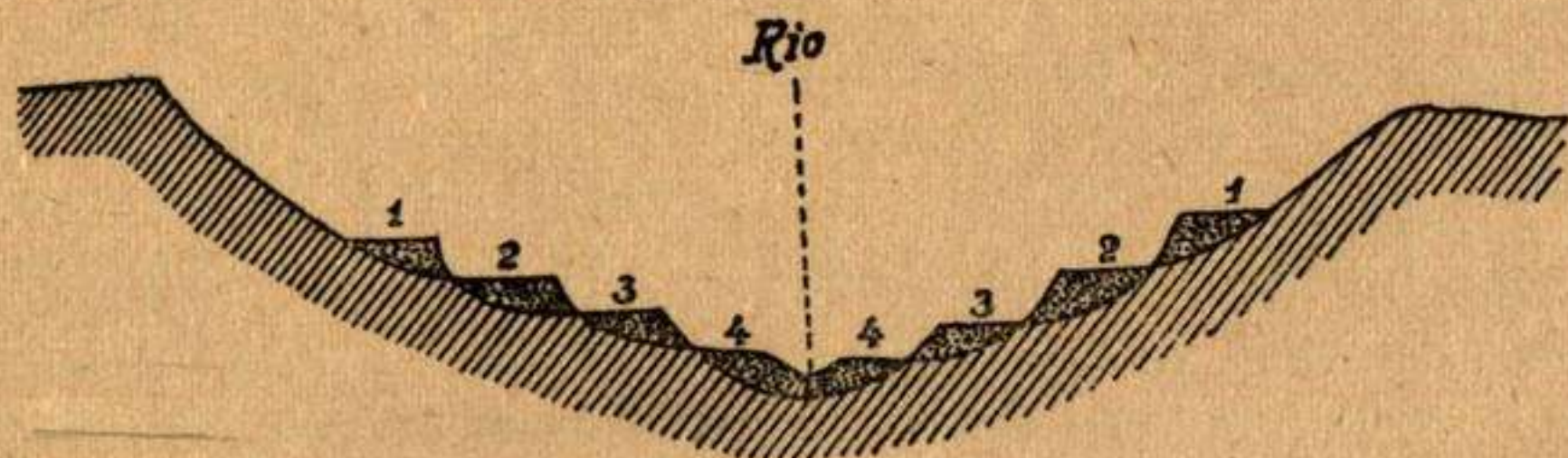


Fig. 45.—Terrazas fluviales encajadas.

ciones se las conoce también con la designación de *fluvioglaciares*. En los ríos españoles principales se presentan a su vez cuatro niveles de terrazas a 10, 30, 60 y 100 metros, que Hernández Pacheco atribuye al glaciario cuaternario. Panzer, Obermayer, etc. han comprobado las relaciones entre las terrazas fluviales y los correspondientes depósitos cuaternarios de origen glaciario en la mayor parte de las sierras españolas.

Ante la heterogeneidad de los sistemas de terrazas observados, y en la imposibilidad de atribuir su formación a una causa única de carácter climático, han ganado terreno dos nuevas concepciones, ambas basadas en las oscilaciones de nivel de base en la desembocadura de los ríos. El mecanismo se explica en la siguiente forma: Cuando el nivel de base de un río desciende, aumenta la pendiente entre sus fuentes y su desembocadura, con lo cual su potencia crece y puede excavar un nuevo cauce hasta alcanzar su correspondiente perfil de equilibrio. De esta forma, después de una serie de fases alternantes de estabilidad y elevación, es posible llegar al terrazamiento. La disparidad de criterios empieza al buscar una explicación a las oscilaciones de los bloques continentales; el dilema isostasia, eustasia,

se nos presenta de nuevo y con las mismas dificultades de resolución que para los movimientos epirogenéticos. En algunos casos, como en el Occidente europeo, las terrazas fluviales son concordantes de altura en extensas regiones; en ellas es posible buscar causas comunes y de carácter general, como son las variaciones en el nivel de los mares. En cambio, en el Mediterráneo, las diferencias en alturas y el número de terrazas en cuencas fluviales próximas es tan diverso, que sólo es posible explicarlo a base de movimientos isostáticos y orogénicos de dovelas corticales de pequeña extensión. Pero, aun en este caso, los partidarios de la primera teoría se preguntan si se tratará simplemente de fenómenos tectónicos localizados que enmascaran variaciones absolutas del nivel de los mares y de los niveles de terrazas constantes para regiones continentales enteras. Si esto llegara a comprobarse, tendríamos un fiel registrador de los movimientos de la corteza terrestre. He aquí uno de los tantos problemas interesantes que plantea el estudio de las terrazas fluviales.

*Morfología fluvial.* — Aunque el estudio de las formas del relieve creadas por la actividad erosiva de los ríos cae por entero en el campo de la Morfología fisiográfica, y se aparta por tanto del dominio propio de la Geología dinámica en la forma que hemos establecido la separación entre ambas ciencias (Introducción), conviene conocer, aun cuando sea de una manera sucinta, las principales formas topográficas propias del modelado fluvial; el mismo criterio se ha seguido en los capítulos anteriores y seguiremos en los de Geología dinámica que aun faltan por explicar. En más de una ocasión, el análisis de las formas del relieve es el camino obligado para encontrar la explicación lógica al modo de actuar de los agentes de la dinámica externa. Además, los fenómenos de erosión y los de sedimentación del modelado normal se presentan tan fuertemente engarzados que resulta difícil hacer su estudio por separado.

Según predomine uno u otro de los tres aspectos principales del modelado fluvial, excavación lineal, erosión lateral y acumulación de derrubios, se distinguen diversos tipos de valles. Si la excavación o erosión longitudinal es más intensa que el retroceso de las vertientes, se forma el *cañón* o *garganta* (*congost* en Cataluña);

pero únicamente suele ocurrir eso cuando el cauce se excava en rocas muy duras. El *valle normal* tiene la forma de una V de brazos más o menos abiertos, simétrica o asimétrica. Cuando predomina la sedimentación, el fondo del valle es plano por haber sido terraplenado con los derrubios del río; en este caso se dice que el valle forma una *artesa fluvial* (fig. 46).

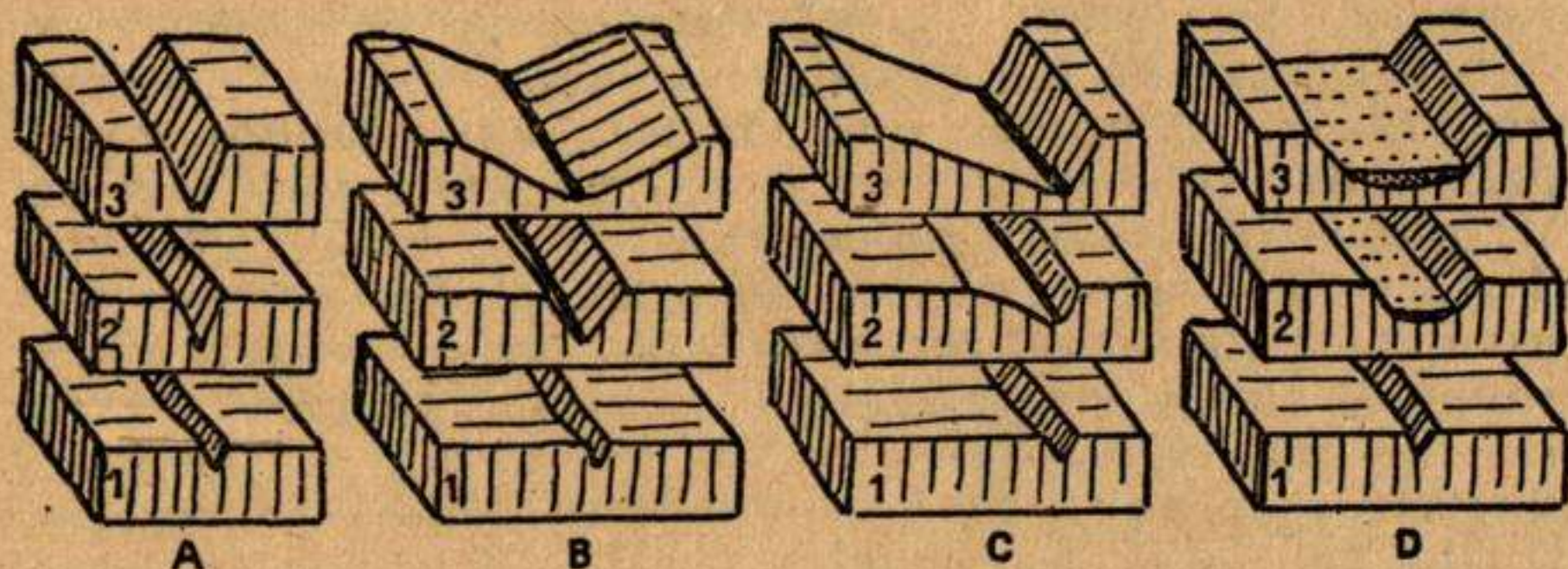


Fig. 46.—Tipos de valles. A, cañón o garganta. B, valle normal. C, valle asimétrico. D, valle en artesa fluvial. La numeración indica el sentido de la evolución (Martonne).

Los valles angostos suelen representar la fase inicial en el proceso evolutivo; por eso se dice también que un valle es *joven* cuando sus vertientes son abruptas, mientras que los valles *seniles* y *maduros* son mucho más abiertos a causa de que, por haber logrado el río su perfil de equilibrio, cesa la erosión lineal, continuando únicamente la erosión lateral en las vertientes.

De tres modos distintos se explica la formación de las gargantas profundamente encajadas. En la mayoría de los casos se debe a que todo el país ha sufrido un levantamiento epirogénico intenso, en virtud del cual los ríos han continuado ahondando el cauce durante largo tiempo. Pero en algunos casos no es posible explicar por este procedimiento la formación de profundos desfiladeros, sino en virtud de otros fenómenos que se denominan *antecedencia* y *epigénesis* o *sobreimposición*. La excavación de grandes macizos resistentes se puede explicar admitiendo que el curso fluvial es anterior al plegamiento; en este caso, al plegarse y sobresalir una región del curso, el río no ha tenido más remedio que seguir excavando los materiales duros que aparecían en

su cauce, de la misma manera que si toda la cuenca hubiese sufrido un movimiento de ascenso (*valle antecedente*). Más complicado resulta ser el desarrollo de los *valles epigénicos* o *sobreimpuestos*. En éstos se observa cómo un río abandona los materiales blandos y fácilmente erosionables que se ofrecen a su paso, para penetrar, desviándose, en el interior de un macizo montañoso resistente. Entonces es preciso admitir que en el momento de formación del valle las circunstancias serían distintas de las actuales; se supone que el macizo montañoso, lo mismo que los terrenos blandos contiguos, estarían recubiertos uniformemente por una cobertera sedimentaria homogénea, en la cual empezaría el río a excavar su cauce; después, al desaparecer por erosión el manto de recubrimiento, ya no podría abandonar el curso emprendido y se vería obligado a excavar los materiales duros que se ofrecen a su paso. Un magnífico ejemplo de hoz epigénica ofrece el llamado Torno del Tajo, en Toledo, y algunas gargantas pirenaicas (fig. 47).

También se clasifican los valles en relación con la estructura geológica del país que atraviesan. Si la dirección del río es en el mismo sentido que la inclinación de los estratos, el curso se dice que es *consecuente*; *obsecuente* en el caso contrario, y *subsecuente* cuando el curso del río es paralelo a los planos de estratificación. Esta clasificación tiene el valor de evidenciar la influencia que la estructura geológica puede haber ejercido en la formación del valle y, además, constituye un índice de las resistencias que en uno u otro caso tendrá que vencer la corriente (fig. 48).

Atendiendo a las relaciones de los valles con las líneas directrices del relieve, se clasifican en *longitudinales* y *transversales*, según el curso sea paralelo o perpendicular, respectivamente, a las alineaciones montañosas.

Cuando las capas están plegadas, el valle puede formarse en el fondo del surco o tolva constituido por el plegamiento de las capas (*valle sinclinal*), o bien, por el contrario, puede emplazarse en el eje de los anticlinales, si encuentra allí menor resistencia; en este caso se dice que el relieve se ha invertido (*bray*, del país de Bray, en Bretaña).

*Capturas*. — La ley general en la evolución de los ríos es la lucha por la conquista del avenamiento. Todos los



ríos tienden a expansionar su cuenca hidrográfica receptora, ya sea a causa de la erosión ascendente que desplaza las cabeceras del valle, ya por la continua degradación y retroceso de las vertientes. Así, pues, hasta

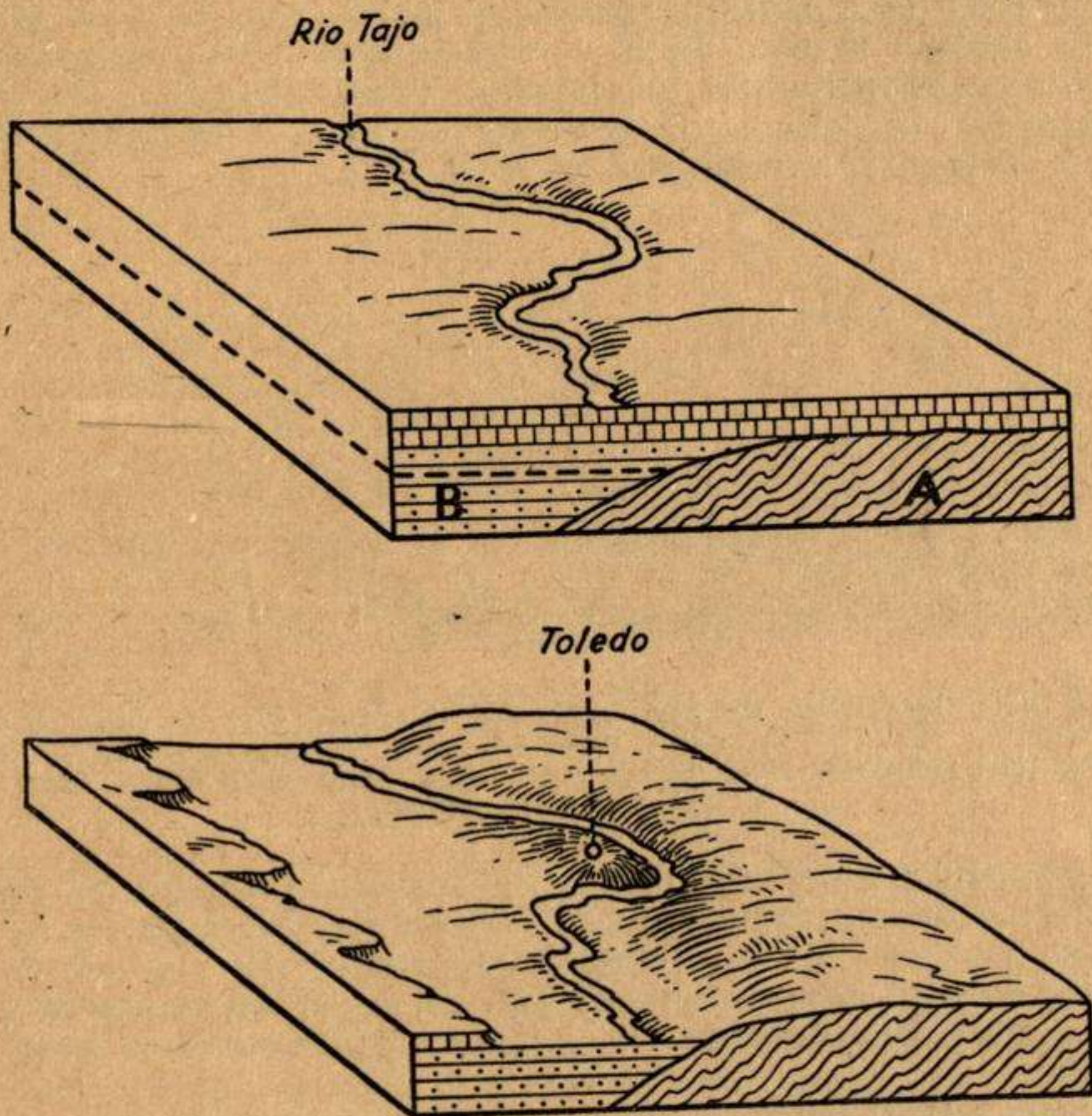


Fig. 47.—Epigénesis del torno del Tajo, en Toledo. A, macizo antiguo plegado. B, cobertera discordante.

llegar a la fase de equilibrio, los flancos y las cabeceras de los valles invaden continuamente nuevos territorios, y una lucha incesante por el avenamiento tiene lugar entre las cuencas hidrográficas vecinas, desplazando el vencedor la línea divisoria de aguas a expensas de las redes hidrográficas próximas. En tal conflagración se

dice que un río ha sido *decapitado* por el otro, cuando tiene lugar un lento desplazamiento de las crestas divisorias; y se dice que ha sido *capturado*, cuando, debido a circunstancias adecuadas, el río entero, o buena parte de él, ha sido desviado de su curso en beneficio de otra cuenca; este último fenómeno suele reconocerse por un cambio brusco en la dirección del curso, aparentemente inexplicable, que recibe el nombre de *codo de captura*; el valle antiguo queda en seco, y se denomina por esta razón *valle muerto* (fig. 48).

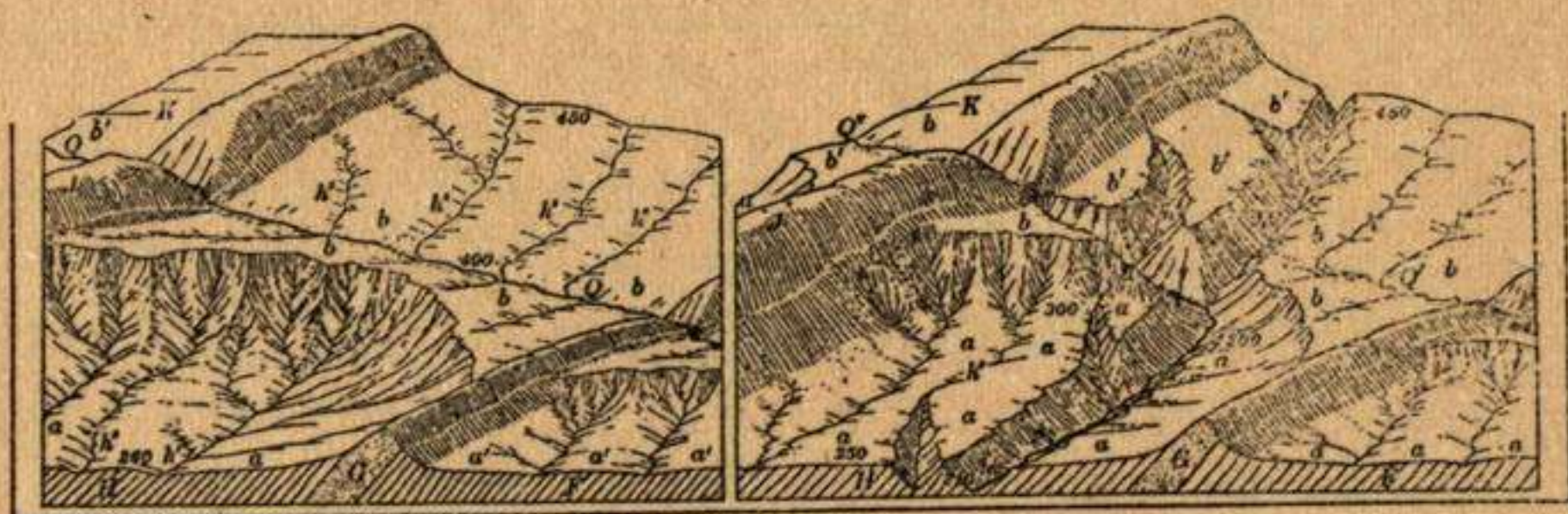


Fig. 48.—Desarrollo de una captura; el curso QQ ha sido desviado por el curso ab, que tiene un nivel de base más bajo; la cota 1300 señala el codo de captura; en la segunda figura, b indica el valle muerto (Davis).

La causa determinante de las capturas radica en las diferencias de pendiente de los cursos fluviales en lucha; por eso los ríos que tienen más bajo el nivel de base son los que se encuentran en condiciones favorables para penetrar en las cuencas hidrográficas adyacentes.

Son numerosísimos los ejemplos de captura. Uno de los casos más curiosos, por haber dado lugar a incidencias políticas, es el que ocurre actualmente en los Andes meridionales, cuya divisoria hidrográfica, a falta de mapas detallados, hace de límite fronterizo entre Chile y la Argentina. Los ríos de la vertiente occidental, chilena, tienen su nivel de base en el Pacífico, mientras que los de la vertiente oriental le tienen en la llanura de la Pampa argentina; por consiguiente, los primeros, dotados de mayor potencia, capturan y obligan a describir un codo brusco a los ríos argentinos, en busca del

nivel de base chileno. El explorador Moreno, con sólo la ayuda de seis hombres, logró abrir una trinchera que obligó al río Fénix a volver a su cauce primitivo. Capturas recientes en el período histórico se observan comparando, por ejemplo, en dos ediciones consecutivas de los atlas modernos de Vidal La-Blache la red hidrográfica de Madagascar.

En las capturas realizadas en períodos geológicos más remotos, la reconstrucción del antiguo cauce sólo puede darse por válida cuando la presencia del pretendido codo de captura coincida con las diferencias de nivel requeridas por tal fenómeno y con la presencia de formaciones aluviales antiguas en el valle muerto. Los ríos de la Meseta Española que corren por la planicie situada entre 600 y 1.000 metros de altitud han sido capturados por los que nacen en los rebordes de la Meseta y discurren por las profundas depresiones del Guadalquivir y del Ebro. Así pueden explicarse las súbitas desviaciones del Júcar en la Mancha y del Jiloca. A semejante fenómeno se atribuye la desviación del curso superior del Duero cerca de Numancia y la del Alberche.

*Relieves policíclicos.* — Hemos visto que, después de un largo período de estabilidad del nivel de base, los ríos alcanzan su perfil de equilibrio; entonces ya no ahondan más su cauce y la mayor parte de la energía se consume en el modelado y aplanamiento de las laderas; finalmente, el valle entero aparece convertido en una llanura suavemente inclinada recubierta en gran parte por depósitos finos procedentes del lento arroyamiento de las vertientes; el río transcurre por un declive suave, llamado *superficie de erosión*. Cuando la estabilidad afecta a una dovela continental entera, esta acción niveladora del relieve tiene lugar en toda la cuenca hidrográfica, la cual, de esta forma, llega a su fase de madurez; las crestas divisorias de los valles, atacadas en cada flanco, se convierten en superficies cada vez más planas; las superficies de erosión de los valles próximos acaban fusionándose, y poco a poco toda la región se convierte en una *planicie levemente inclinada, sarcada tan sólo por amplios valles superficiales reducidos a simples ondulaciones*; el país ha alcanzado su fase senil, es una *penillanura* (fig. 5).

Si un cambio brusco eleva el nivel de base, se rompe

el equilibrio y la red hidrográfica se rejuvenece; con el aumento en la pendiente, la denudación se vigoriza, recobra su energía y, a partir de la desembocadura, empieza a excavar un nuevo cauce más hondo, que, en virtud de la erosión regresiva, progresa rápidamente aguas arriba. El nuevo cauce hiende profundamente la planicie del valle maduro de antaño; dos ciclos conviven en este caso en el mismo valle: uno, en su fase de madurez, lentamente atacado por el otro en pleno vigor juvenil. Si antes de haber alcanzado este último la parte superior del curso entra en juego otra variación en el nivel de base, el nuevo ciclo se propagará también valle arriba como una onda que quedará impresa en el relieve. En virtud de ese ritmo, el valle se

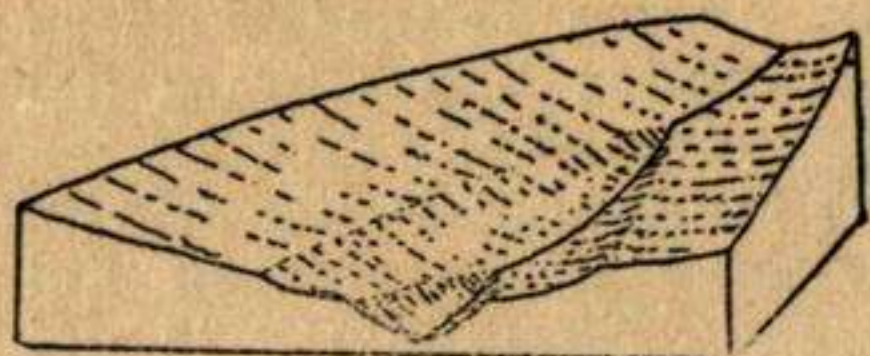


Fig. 49.—Relieve policíclico (3 ciclos) según Baulig.

convierte en una inmensa gradería, en la cual los rellanos correspondientes a cada ciclo se escalonan a diversas alturas, dando lugar en cierta forma a un valle compuesto por la acumulación de los restos de ciclos anteriores; es el llamado *relieve policíclico* (fig. 49).

En el perfil longitudinal de los cursos de agua se aprecian los distintos ciclos de erosión por cambios de pendiente que no coinciden con modificaciones en la dureza de las rocas del cauce.

### Aguas subterráneas

Toda el agua de lluvia no afluye de momento a los cursos de agua superficiales, sino que buena parte se infiltra y desaparece por las finas hendiduras (*diaclasis*) de las rocas compactas, o atraviesa por capilaridad los intersticios de las tierras poco coherentes, llegando a profundidades variables según la compactidad de los materiales atravesados. Estas aguas, llamadas de *imbibición*, empapan el terreno hasta cierta profundidad y forman las llamadas *capas freáticas*, que exudan en forma de fuentes en los cortes naturales del terreno y alimentan los pozos y manantiales. Además son un elemento esencial en la labor demoledora de la

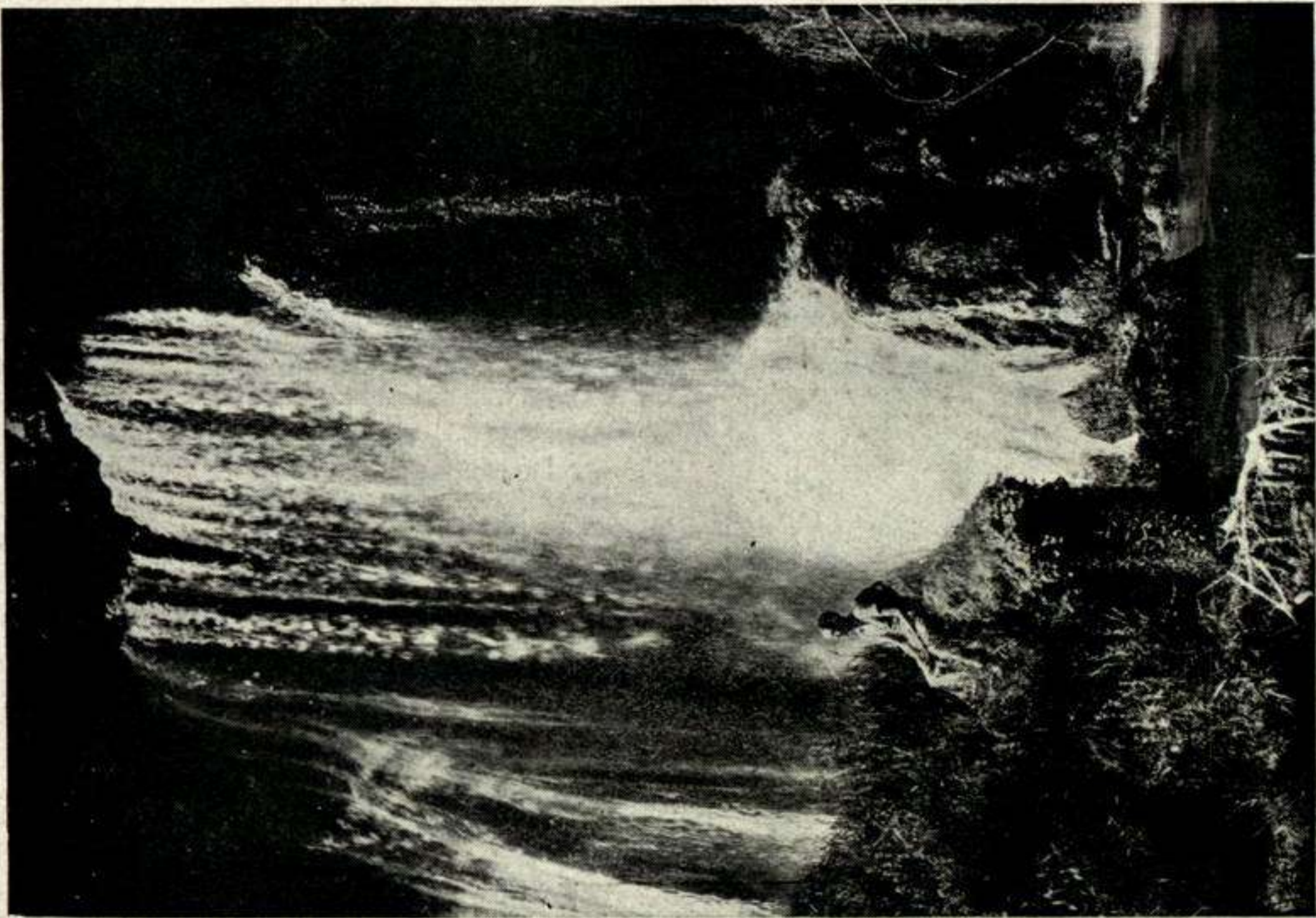


Fig. 1. — Cascada de la Caprichosa en el río Piedra (Zaragoza).  
(Foto. Solé)

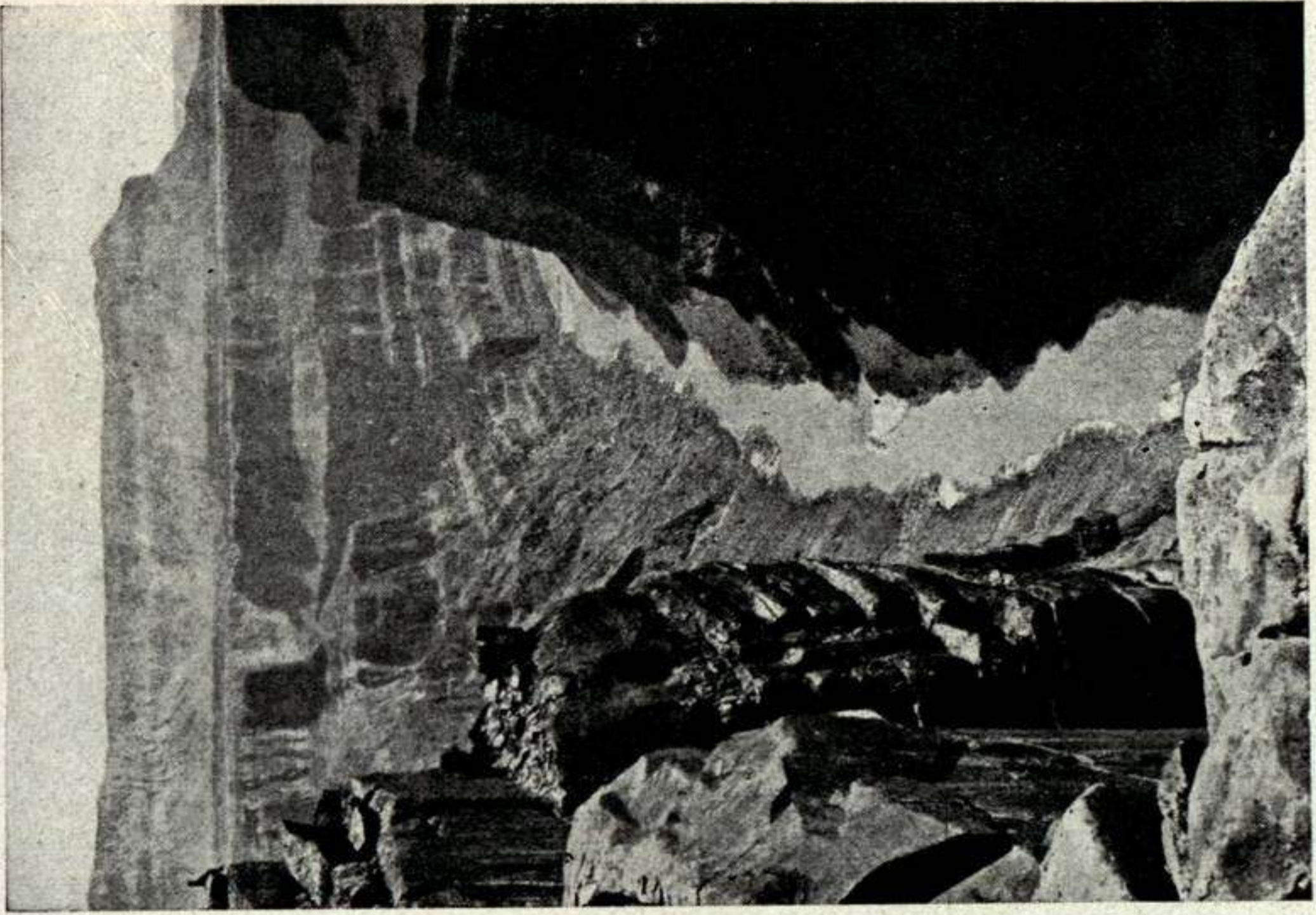


Fig. 2. — El Cañón del Colorado, en Arizona.  
(De Supan)

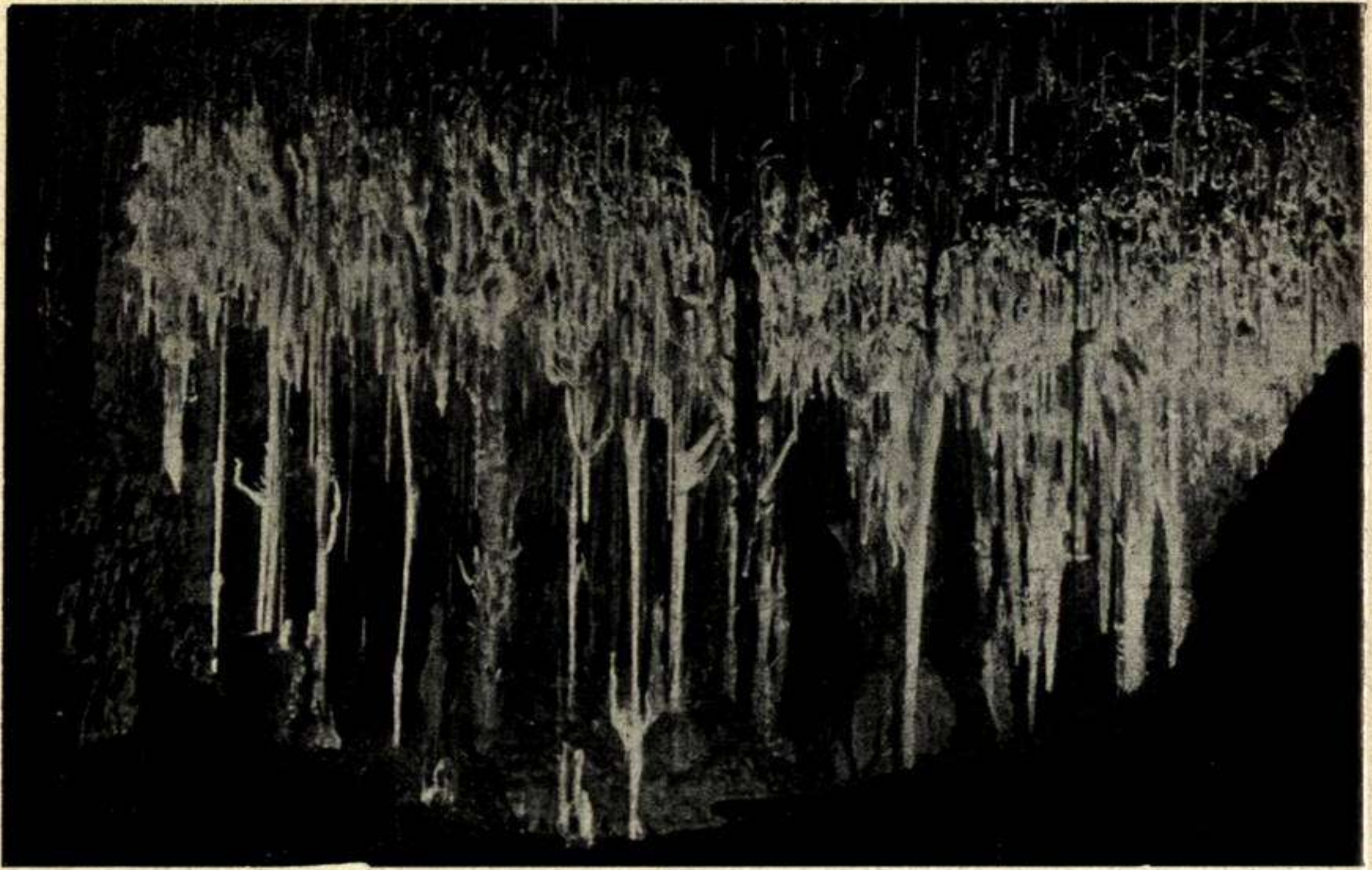


FIG. 1. — Cuevas dels Hams en Manacor (Mallorca); cortinaje de estalactitas y estalacmitas.

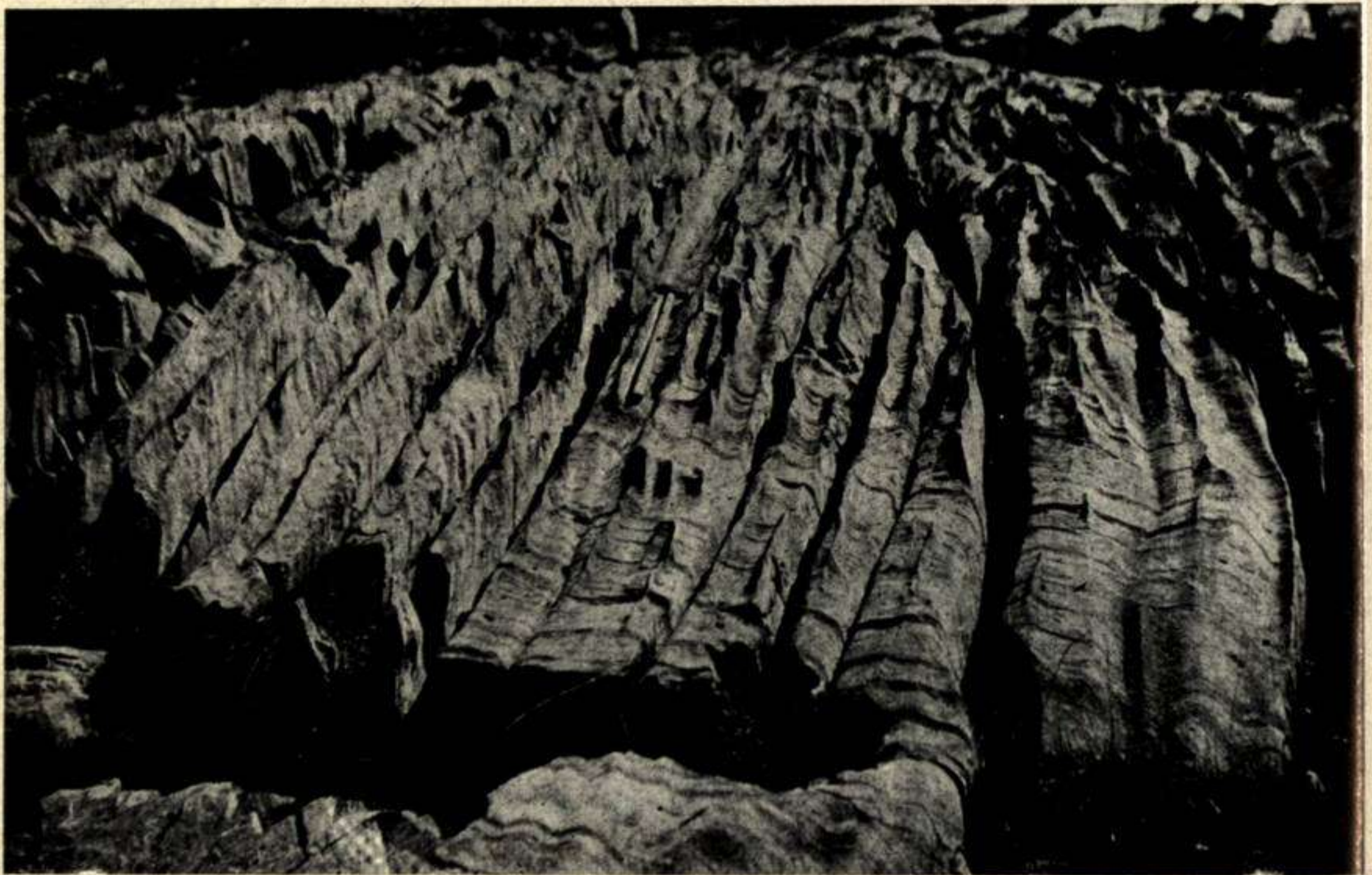


FIG. 2. — Lapiez en las calizas devónicas del valle del Esera (Pirineo aragonés). (Foto. Solé)

intemperie y son capaces de provocar notables resbalamientos de tierras en los terrenos arcillosos.

En los macizos constituidos por rocas solubles, como el yeso, la sal y la caliza, la acción geológica de las aguas subterráneas reviste caracteres de excepcional importancia, ya que llegan a constituir verdaderos cursos de aguas que circulan por las cavidades excavadas por disolución. Se comprende, según eso, que el trabajo y las formas del relieve desarrollados por el agua de imbibición y por las aguas subterráneas propiamente dichas serán de muy diversa naturaleza.

*Deslizamientos.*—Las aguas que se han infiltrado hasta cierta profundidad y encuentran niveles arcillosos o margosos obran como lubricante y sobre ellos resbalan las rocas que se hallan encima. Estos deslizamientos o *argayos*, a veces llegan a ser catastróficos; a título de ejemplo puede tomarse el caso del pueblecito de Puigcercós (Lérida), que en una noche llegó casi a desaparecer totalmente a causa de un resbalamiento de tierras. En geología suelen designarse con el nombre italiano de *frana*.

*El Carst.*—El agua de lluvia que cae sobre una masa rocosa soluble produce el típico acanalado que ya conocemos (*lenar, lapiaz*); pero, además, al circular por las grietas y hendiduras, las ensancha por disolución, se reúne en finos hilillos, con lo que aumenta su poder erosivo, y así, al cabo de algún tiempo, todo el roquedo aparece como carcomido interiormente y atravesado por hondas cavidades y cursos subterráneos que absorben totalmente el agua de lluvia que cae en la superficie. Ésta aparece descarnada y desprovista casi de toda vegetación, con los grises calveros calcáreos que proporcionan un aspecto desolado al paisaje; es el relieve característico de los macizos calizos, y es tan frecuente, que en muchos países recibe nombres vulgares: *carso* o *carst* en la Península de Istria (Italia), *causses* en Francia, *torcal* en España; en la terminología científica ha prevalecido el nombre italiano, conociéndose con la denominación de *cárstico* este tipo de modelado.

Exteriormente se manifiesta, además del estriado de las rocas, con la aparición de hoyas circulares de escasa profundidad, desprovistas de avenamiento exterior y producidas por el hundimiento de cavidades interior-

res; en España se llaman *torcas* (*bofias* en Cataluña), y en términos aceptados universalmente *dolina*. Cuando se fusionan varias dolinas, se forman depresiones mayores, que, según su importancia, reciben los nombres de *uvala* y *poljé*, en cuyo fondo suele encontrarse un delgado manto de tierras fértiles, única región del *carst* aprovechable para el cultivo.

En el interior del macizo la circulación del agua da lugar a la formación de *simas* (*avencs* en Cataluña) y *cuevas* grandiosas, según la perforación tenga lugar en sentido vertical o en sentido horizontal. El agua que circula por estas cavidades interiores está saturada de sales calcáreas, y por eso, cuando gotea a través de los techos y paredes de las cuevas y se evapora, se precipita la caliza que lleva en disolución, depositándose largos penachos que cuelgan del techo (*estalactitas*), o en columnatas que arrancan del suelo (*estalacmitas*). Las primeras se distinguen de estas últimas por estar recorridas interiormente por un fino conducto por donde cae el agua.

La circulación subterránea tiene un límite impuesto por la presencia de niveles margosos o arcillosos impermeables. Al llegar aquí, el agua no puede seguir penetrando más adentro y entonces circula por el interior siguiendo el buzamiento de dichas capas hasta que éstas afloran al exterior en algún corte natural del terreno, vertiéndose en este momento súbitamente la enorme masa de agua recogida por la esponja cárstica (*fuentes vauclusianas*, de Vauclus, Francia).



## CAPÍTULO XI

### ACCIÓN GEOLÓGICA DEL HIELO

El agua en estado sólido, nieve o hielo, ejerce un papel importante en el modelado terrestre, y su acción se hace sentir intensamente en las zonas polares y en las cumbres elevadas.

Una parte de la nieve que cae en las montañas se funde en cuanto aumenta la temperatura, pero queda una gran masa que se congela y persiste todo el año, aun en las épocas estivales de fuertes calores. Las alturas coronadas constantemente por el manto niveo constituyen la *región de las nieves perpetuas*, y el borde inferior de éstas, el llamado *límite de las nieves persistentes*. En estas regiones, el único agente modelador es el hielo; pero aun fuera del dominio de las nieves eternas, la acción geológica del agua en estado sólido trasciende de una manera intensa por las heladas nocturnas, tal como se expuso al tratar de la acción de la intemperie; por eso aquí sólo serán tratados aquellos aspectos concernientes a las regiones en que el hielo es el agente geológico dominante.

#### Aludes

La nieve que incide en las crestas o en las laderas escarpadas, se sostiene con dificultad, se escurre pronto y apenas deja rastro; pero la que se acumula en hondonadas, barrancos y lomas, y, en general, donde existe base suficiente en que apoyarse, adquiere espesores muy subidos; y cuando se deposita en terreno de pendiente algún tanto acentuada, por razón de la gravedad resbala hasta el fondo de los valles formando las *avalanchas* o *aludes pulverulentos y profundos*.

En el primer caso, se trata de masas de nieve esponjosa, de equilibrio inestable, que se deslizan por las pen-

dientes formando una masa esferoidal de gran tamaño que va aumentando de volumen a expensas de la nieve que encuentra a su paso. Su influencia es escasa en el relieve. Los aludes profundos corresponden a aglomeraciones más compactas, que resbalan sobre el suelo humedecido por el agua de fusión de las capas superficiales que obra como lubricante; esa masa de hielo, en carrera veloz, arrolla cuantos obstáculos se interponen en su camino; hiende la tierra con huellas profundas, arrastra piedras enormes, arranca de cuajo árboles corpulentos, derriba edificios y provoca verdaderas catástrofes.

Los aludes pulverulentos cuajan en cualquier época del año y se funden pronto; los aludes de fondo se forman en primavera y muchas veces se resisten al deshielo aun en pleno verano.

### Glaciares

La nieve acumulada en la región de las nieves persistentes se congela y constituye una gran masa sólida que se desliza suavemente por las hondonadas o angosturas a manera de un verdadero río de hielo que se llama *glaciar*; es el agente modelador por excelencia del paisaje de las altas montañas y de las regiones polares.

En el glaciar pueden considerarse tres partes equiparables en un todo a la cuenca de recepción, canal de desagüe y cono de deyección, de los cursos torrenciales. La primera, por donde se origina el glaciar, es la *cuenca de alimentación*; ésta es un campo receptor u hondonada rodeada de picos y crestas en la que se aglomera la nieve caída directamente durante las nevadas y la que se desprende de las alturas circundantes; se continúa por el *valle* al que se amolda el manto de hielo recogido en la parte alta, formando la *lengua del glaciar*, la cual se mueve y avanza hacia las partes bajas, y, por último, la extremidad de la lengua o *frente del glaciar*, en donde se funde el hielo a causa de las temperaturas elevadas y en donde abandona los materiales transportados por la propia masa.

La nieve que se recoge en el campo de alimentación se transforma pronto en hielo compacto, que es el que encontramos en todo el curso del helero.

Examinemos el proceso de esta transformación. La nieve, conforme se amontona en la base receptora, presiona con su peso las capas inferiores, las cuales, por dicha causa, se hacen más compactas y expulsan buena parte del aire intercalado entre los cristales. Por efecto del calor solar, las capas superficiales se derriten y el agua penetra por los intersticios hasta las más profundas, donde vuelve a helarse, y de paso suelda los cristales unos con otros, convirtiéndolos en gránulos de hielo; esta transformación repetida en sucesivas etapas termina por alcanzar a todo el contenido nevoso, constituyendo entonces el *névé* o *neviza*. La operación prosigue a lo largo del curso, con lo cual la nieve se convierte finalmente en una masa compacta, granujienta y translúcida de hielo glaciario, enteramente distinto del hielo derivado de la simple congelación del agua.

En cortes naturales o en las grietas, se nos muestra cómo el hielo de los glaciares está dispuesto en capas de color blanco alternando con otras de matiz azul, separadas con frecuencia por delgados mantos de finísimo polvo o materiales detríticos. Estos tenues depósitos pulverulentos se originan en la cuenca receptora. En invierno, las aportaciones de nieve se suceden con intervalos muy cortos, sobreponiéndose las unas a las otras sin solución de continuidad; pero en la sequía, el tiempo que media entre dos nevadas consecutivas es lo suficiente largo para que el viento pueda acarrear ese manto pulverulento, que luego queda cubierto por la nieve invernal y conservado en la neviza lo propio que en el hielo del valle. El color de los estratos depende de la mayor o menor cantidad de aire aprisionado entre los cristales o glomérulos. La nieve que se precipita en verano se funde pronto y con el rehielo expulsa el aire contenido entre sus cristales, formando capas compactas azuladas y transparentes. En cambio, la nieve que cae en invierno es espesa, con numerosas partículas gaseosas intercaladas entre los copos, las cuales no son expulsadas, pues apenas si se funde, y son las que dan al hielo la opacidad y blancura.

Así se van formando alternativamente capas blancas y azules que en la cuenca de recepción aparecen horizontales o ligeramente inclinadas hacia el valle; pero conforme van entrando en la lengua del glaciario, son

comprimidas y plegadas con el objeto de adaptarse a la estrechez del cauce, y acaban dibujando la forma de éste.

En la superficie de la lengua glaciaria se nota también la alternancia de capas blancas y azuladas, que a causa del afloramiento natural de los estratos aparecen cortadas oblicuamente, por lo que toman la forma de ojivas o arcuaciones de estilo gótico, con la convexidad hacia abajo; este contraste se nota todavía mejor a causa de que las capas blancas, menos compactas, se funden primero y producen canales o surcos, que se rellenan de polvo, separados por pequeñas crestas de límpida transparencia. Cuando se fusionan dos glaciares, cada uno conserva su estructura zonar y ojival con entera independencia del otro, y las dos lenguas descienden paralela y simplemente pegadas por sus bordes.

*Movimiento de los glaciares.*—El investigador alpino Higi, para estudiar el fenómeno de los heleros, construyóse una cabaña en la lengua del glaciar de Unteraar, en la cual pudiera guarecerse; a los tres años observó con sorpresa que la cabaña se había desplazado cien metros más abajo, y a los catorce pudo contemplarla a 1.500 metros del lugar donde originariamente la había emplazado. Otros hechos parecidos habían ya observado anteriormente los montañeses suizos acerca de objetos o cadáveres de alpinistas caídos en las grietas del glaciar, los cuales solían aparecer unos años más tarde en el frente del mismo. Esto indujo a sospechar que el hielo de los glaciares se movía lentamente a pesar de su aparente inmovilidad. Las consideraciones de orden teórico conducen también al mismo resultado; basta tener en cuenta que las continuas aportaciones de nieve no aumentan el espesor del campo de recepción, sino que éste permanece constantemente a la misma altura, para lo cual es indispensable que se efectúe por el valle una evacuación de hielo equivalente a la masa acumulada durante las nuevas aportaciones.

Para el estudio metódico del movimiento del glaciar se plantaron series de estacas alineadas según lo ancho de la lengua; al cabo de algún tiempo se observó que se habían desplazado formando un arco, con la convexidad hacia abajo; es decir, el descenso había sido más acelerado en el centro de la lengua que en la periferia

a causa del rozamiento con las paredes del cauce. El movimiento, es, pues, parecido al del agua de los ríos, que alcanza la máxima velocidad en el centro de la corriente y un poco por debajo de la superficie, en donde los frotamientos son menores (fig. 50).

El movimiento de la masa de hielo desde el campo de alimentación hasta el frente del glaciar se efectúa lentamente y varía con la masa y con la pendiente del valle o con la temperatura. En los glaciares alpinos se ha observado que varía entre diez y cien metros por año. En el glaciar de Aneto (Pirineos) las medidas efectuadas evalúan el desplazamiento en unos 10 metros anuales.

Causa cierta extrañeza que el hielo, duro y quebradizo como el vidrio, se amolde tan perfectamente a las irregularidades del cauce y circule por él como si fuese una pasta fácilmente moldeable o que tuviese la consistencia de un líquido viscoso. Se han buscado

diversas explicaciones a este hecho aparentemente relacionado con las propiedades físicas y mecánicas del hielo cuando se experimentan sobre un bloque aislado. La plasticidad del hielo es debida a la presión que éste experimenta al ser aprisionado entre las estrechas paredes del cauce, a cuyas irregularidades se adapta lentamente. El fenómeno es parecido a la flexibilidad que se manifiesta en una barra de hielo que estando sujeta por sus extremos soporta un peso en el centro; la plasticidad, parecida a la de la cera, que en este caso experimenta, en nada se asemeja a las rupturas bruscas que

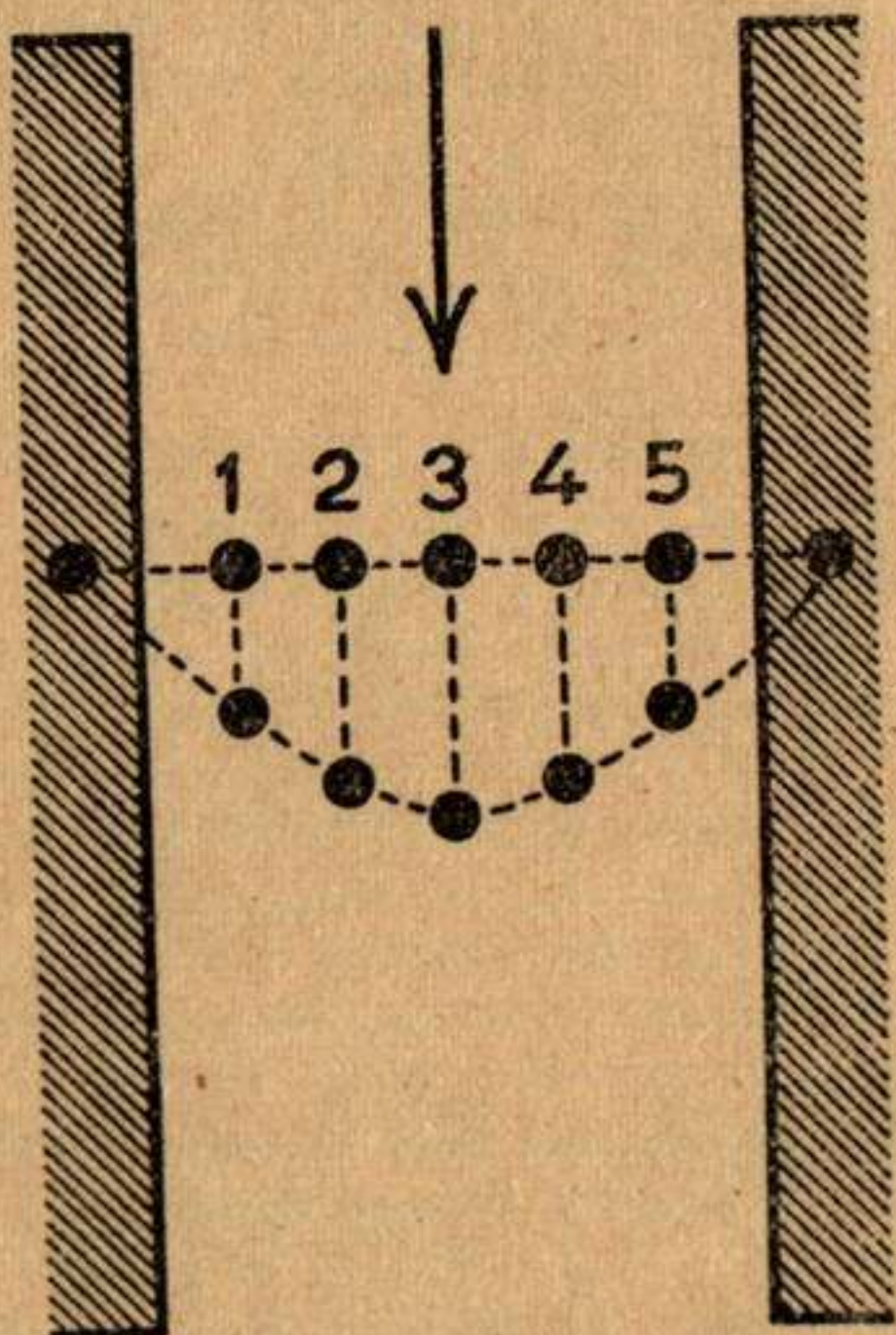


Fig. 50.—Movimiento del hielo en la lengua glaciar.

se producen cuando la misma barra es sometida a una tracción rápida.

Además, contribuye a la plasticidad del glaciar el fenómeno del *rehielo*. Efectivamente, al aumentar la presión por estrecharse el cauce, disminuye el punto de fusión del hielo, éste se funde, y el agua de fusión se escurre por entre los intersticios que dejan los gránulos de hielo, hasta llegar a una región, en donde, por disminuir la presión, aumenta el punto de congelación y el agua vuelve a helarse; así, con este juego de la fusión y el rehielo, la masa endurecida adquiere una consistencia variable que le permite amoldarse a la forma del cauce.

*Consecuencias del movimiento glaciar.*—El movimiento del hielo determina algunas particularidades en la estructura y accidentes del glaciar, así como la fuerza viva desarrollada en el movimiento es causa de la importancia que el hielo tiene como agente geológico.

Las rocas y salientes pronunciados que aparecen en el cauce determinan un abombamiento de la capa de hielo de la lengua glaciar, y como la elasticidad de aquél tiene ciertos límites, resulta que si la tracción es un poco intensa, la superficie se resquebraja y se originan grietas, que, según la relación que guarden con la dirección del curso, pueden ser transversales, longitudinales y marginales. En todo caso, resulta que, por encima del resalto, el grueso del hielo que gravita sobre el fondo es menor que en sus lados, y, por tanto, será también menor la erosión que estos accidentes sufren con relación al resto del cauce. El hielo tiende, pues, a exagerar las irregularidades primitivas del curso, ya sea creando crestas longitudinales, ya sea acreciendo los saltos transversales. En este último caso, cuando el cambio de pendiente resulta muy acentuado, puede producirse la ruptura de la lengua, en cuyo caso se cuarteaa en grandes bloques, llamados *seracs* en Suiza, los cuales se precipitan con estrépito en verdadera cascada de hielo. La acción del glaciar es opuesta a la del río; éste acaba destruyendo los resaltos y cascadas del valle, regularizando totalmente el curso hasta lograr una pendiente continua; en cambio, el glaciar acentúa los cambios de pendiente convirtiéndolos en verdaderos escalones que accidentan el valle (fig. 51).

Otra consecuencia derivada del movimiento del glaciar es la acumulación de depósitos de derrubios recogidos durante el trayecto. Éstos son de origen diverso; unas veces son cantos caídos de las vertientes sobre la lengua o en el campo de alimentación; otras son las arenas y cantos que el propio glaciar arranca al transportar y restregar la masa de hielo contra las paredes del cauce. Si las piedras que caen sobre el hielo son de gran tamaño, ordinariamente no pasan de la superficie; protegen de las irradiaciones solares el hielo de

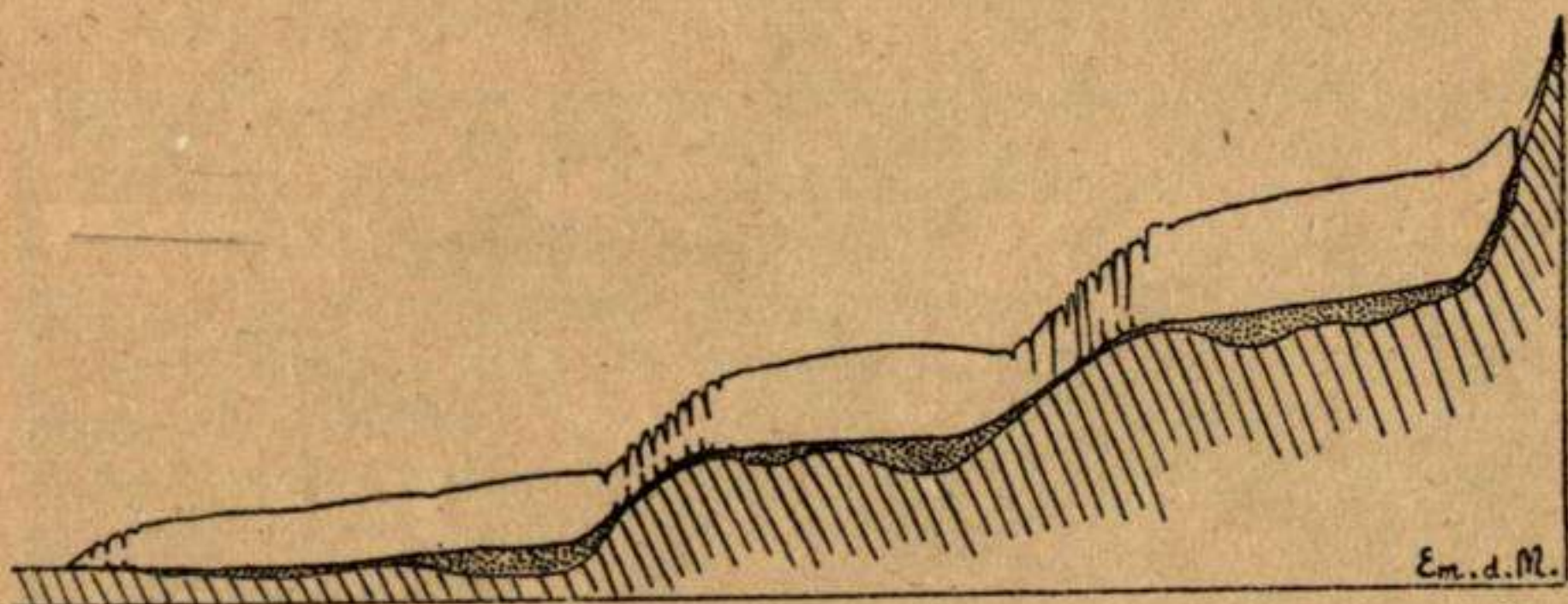


Fig. 51.—Perfil longitudinal de un glaciar (Martonne); compárese con el perfil longitudinal de un río (fig. 41). Sobreexcavación de cauce en los rellanos donde se acumula el hielo y formación de escalones por debajo de las grietas.

debajo mientras se derrite el de las proximidades, y así queda una columna o peana, coronada por el bloque de piedra (*mesa glaciar*), de una forma análoga a las *dame-coiffé* producidas por arroyamiento en las arcillas. Si las piedras son de menor tamaño, el calor absorbido por las mismas es suficiente para derretir el hielo que las sostiene y facilitar el paso de los pequeños bloques hacia el interior de la masa de hielo a través de un *pocito* o canal.

Tengan uno u otro origen, el glaciar arrastra enormes cantidades de derrubios que el propio movimiento del glaciar tiende a acumular en determinadas regiones del mismo, originando las llamadas *morrenas*. Éstas se clasifican en *móviles* y *fijas*.

Las morrenas en movimiento se dividen en *superficiales*, *interiores* y *de fondo*. De las primeras, unas son

*laterales*, compuestas de cantos irregulares, *angulosos* y de distinto tamaño, ocupando los bordes de la lengua; se constituyen con los materiales que caen en los bordes del glaciar y con los que éste arranca de las paredes laterales. Cuando dos lenguas se juntan para constituir otra compuesta, en el centro de ésta coinciden la morrena lateral izquierda de una lengua con la lateral derecha de la otra, que al ponerse en contacto se fusio-

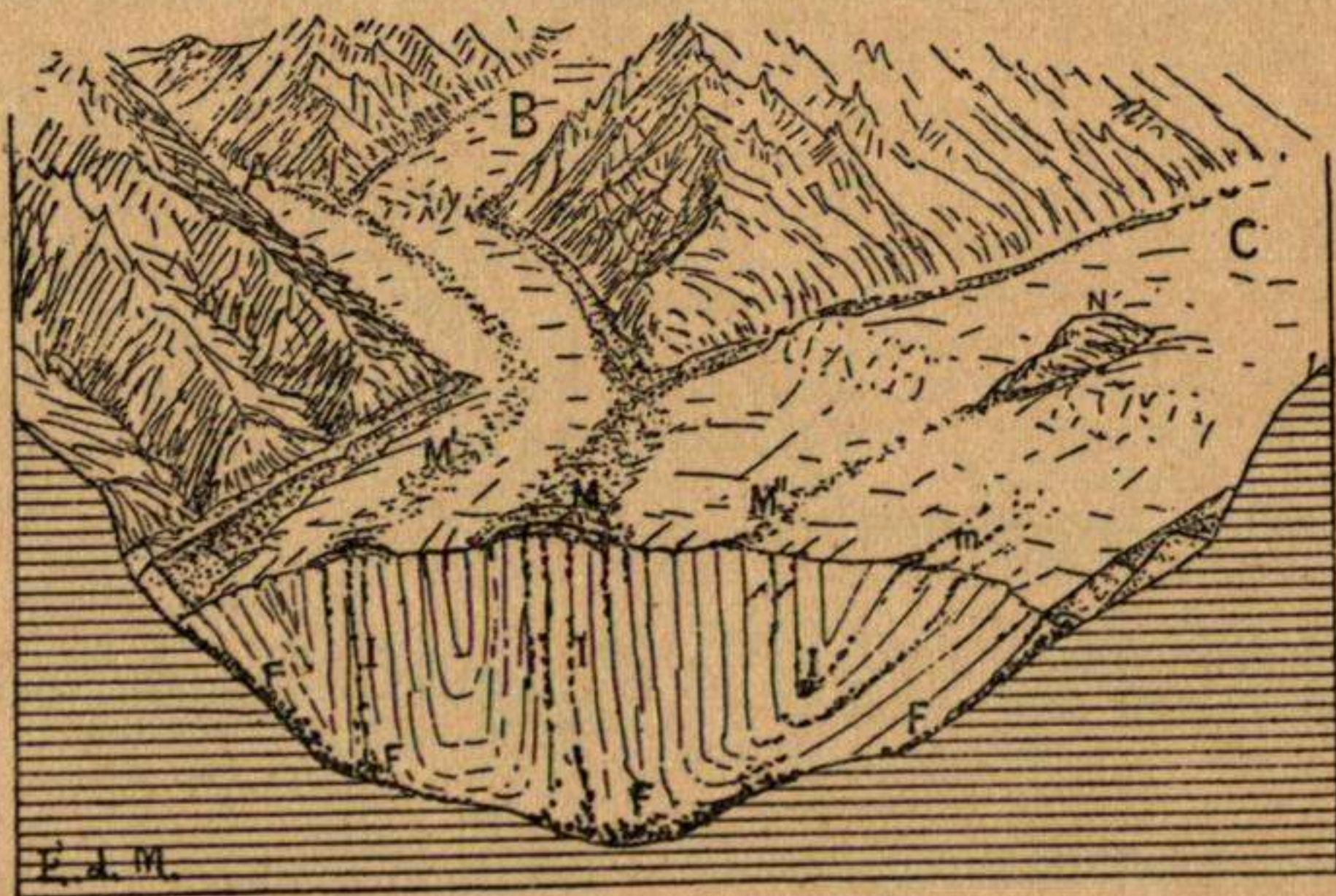


Fig. 52.—Esquema de una lengua glaciaria (Martonne). A, B y C, lenguas confluentes. M, M', morrenas centrales formadas por la fusión de las morrenas laterales. F, morrenas de fondo. I, morrenas interiores.

nan y forman la denominada *central* o *mediana*. Las *interiores* están metidas entre la masa helada (fig. 52).

Las morrenas *fijas* pueden ser *frontales* y *marginales*. Conforme aumenta el deshielo, los derrubios laterales quedan abandonados en la superficie glaciaria, donde se acumulan en montículos estrechos, que a veces alcanzan hasta 30 metros de altura; todos ellos se depositan con los otros elementos transportados alrededor de la extremidad del valle a modo de dique o presa



en arco de herradura, de concavidad abrupta, mirando aguas arriba y de pendiente suave en la parte opuesta. Es la *morrena frontal*, que con el retroceso sucesivo del

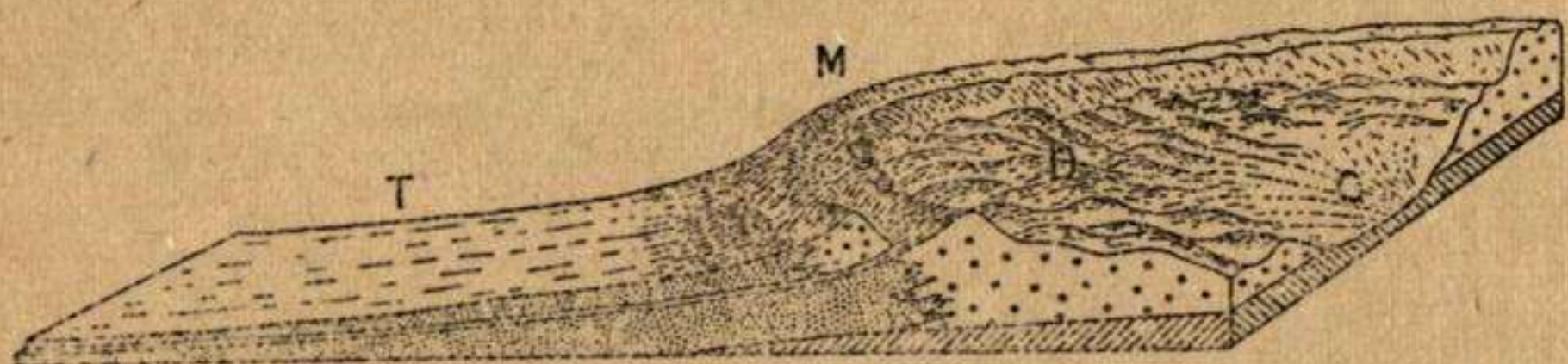
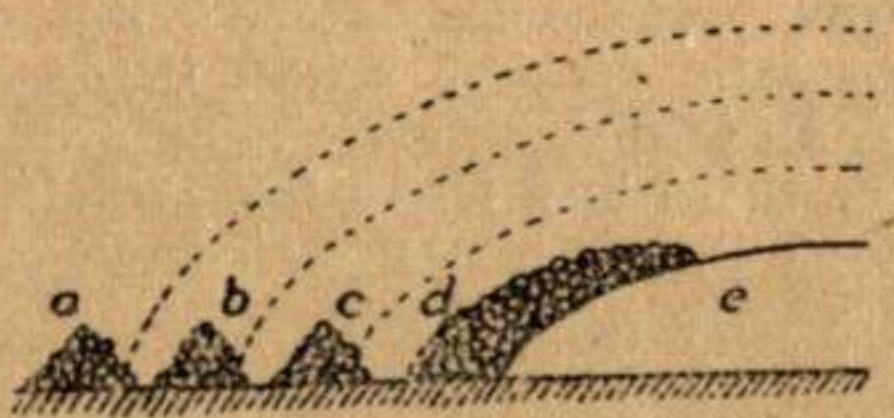


Fig. 53.—Morrena frontal (Penck). *M*, morrena. *T*, cono fluvio-glaciar. *D*, drumlings.

glaciar se va reproduciendo de trecho en trecho en la propia forma para constituir el anfiteatro morrénico (figs. 53 y 54).

Las *morrenas marginales* son grandes cordones de piedras que alcanzan hasta 100 metros de altura, las

Fig. 54.—Retroceso de la lengua glaciar (*e*) y depósito de morrenas frontales (*a*, *b*, *c*, *d*).



cuales quedan abandonadas en las paredes poco escarpadas del cauce glaciar, a medida que se produce el deshielo de los bordes de la lengua.

### Tipos de glaciares

El tipo descrito hasta ahora es el llamado *alpino* o *de valle*, en que cada uno cuenta con una base de alimentación independiente y una lengua propia, conservando cada glaciar su individualidad. Domina en los Alpes, Cáucaso, Himalaya, etc.

Pero no todos los glaciares poseen los mismos elemen-

tos ni iguales caracteres; éstos dependen del clima y del relieve continental. En el tipo *escandinavo*, peculiar de las montañas de Noruega, consta de un vasto campo de alimentación llamado *field*, que recubre las altas mesetas escandinavas, del cual parten numerosas lenguas glaciares en todas direcciones. (En la región de Jostedal figura un *field* que alcanza 40 kilómetros de largo por 20 de ancho.) Se diferencia, pues, del tipo alpino en que una sola base receptora alimenta varias lenguas glaciares.

El pronunciado relieve de la cadena costera de Alaska, de crestas individualizadas y valles ramificados bastante profundos, junto con la abundante precipitación de nieves propio del clima, originan el tipo glaciar de *pie de monte* o *piedmont*, consistente en varios campos receptores independientes y separados por crestas montañosas agudas, con sus respectivas lenguas, que fluyen muy nutridas y se fusionan al pie del núcleo montañoso en mantos muy extensos que avanzan hacia el mar. La fusión de las unidades tiene, pues, lugar en su parte terminal, mientras en el anterior, a causa del relieve, es en el nacimiento. Este mismo tipo, situado en latitudes más cálidas se convertiría en glaciar alpino. El glaciar de Mur abarca 4.000 kilómetros y el de Malaspina, en Norteamérica, más característico, tiene 96 kilómetros de longitud y 3.500 kilómetros cuadrados de superficie.

El tipo *groenlándico* o *inlandeis* se da en las regiones llanas y muy frías; consta de un ancho campo de hielo, sin aparatos independientes; el glaciar forma una sola y única masa suavemente ondulada, que cubre regiones enteras, con la sola emergencia de algunas crestas rocosas llamadas *nunataks*, que afloran en el mar de hielo, y de cuyos bordes arrancan diversas ramas que llegan al mar rompiéndose en grandes bloques flotantes.

Finalmente, existe el tipo de *circo* o *pirenaico*, propio de las montañas meridionales secas, en las que el límite de las nieves perpetuas se encuentra a gran altitud y no permite el desarrollo de la lengua. Domina en los Pirineos, Montañas Rocosas de Norteamérica, etc. Se compone tan sólo de la cuenca de alimentación; son glaciares *suspendidos*, que ocupan las cubetas o rellanos de las montañas.

En los glaciares situados en países fríos, cuyas lenguas penetran en el mar, por efecto de las mareas, se

## CLASES DE GLACIARES



FIG. 1. — Glaciares suspendidos, de la Maladeta, en el Pirineo.  
(Foto. Zerkowitch)



FIG. 2. — Glaciar de tipo alpino (Alpes franceses).



FIG. 1. — Lago glaciar de valle, en Como (Italia); al fondo la morrena causante del estancamiento. (Foto. Vasconi)



FIG. 2. — Lago cerca de Hamburgo, en la llanura del norte de Alemania. (Foto. Solé)

rompen aquéllas en enormes bloques que, por ser menos densos que el agua, flotan en ella constituyendo un serio peligro para las embarcaciones. La catástrofe del *Titanik*, gran transatlántico norteamericano, se debió a un choque con uno de ellos. Se les conoce con el nombre de *icebergs* o témpanos de hielo; a veces tienen hasta 80 y 100 metros sobre el nivel del mar y algunos kilómetros de longitud, y si se tiene en cuenta que sólo emergen en proporción muy reducida, nos formaremos una ligera idea de su magnitud e importancia.

### Modelado glaciar

Los glaciares, con su movimiento, realizan una labor geológica de importancia extraordinaria; mientras por un lado arrancan y transportan materiales pétreos y detritos desde las alturas a los llanos situados al pie de las montañas, por otro marcan las huellas de su paso con signos inconfundibles, que quedan impresos en el relieve.

El paso del glaciar se manifiesta en el roquedo duro y compacto por un pulimentado típico, que se produce por el frotamiento con el hielo, arenas y tierras finas; los bloques, en cambio, producen sobre las superficies pulimentadas unas estriás dirigidas en el sentido en que se mueve la lengua glaciar. Otras veces ostenta el suelo un buen número de canalones en forma de mediacaña de hasta 50 centímetros de profundidad y absolutamente rectilíneos. Es el resultado de la labor realizada por el hielo en movimiento, el cual obra como un bruñidor provisto de largos dientes. En las rocas esquistosas o con diaclasas, el exterior se ofrece acanalado a consecuencia de las escamas o astillas que saltan al impulso de la presión y del roce con la masa helada.

A menudo se observan rocas de no gran tamaño, pulimentadas y con estriás, que presentan un perfil suavemente convexo aguas arriba y abrupto en la parte opuesta, las cuales, vistas desde lejos, ofrecen el aspecto de un rebaño de corderos tumbados, por cuyo motivo se las denomina *aborregadas*. La causa de la disimetría de estas rocas es la misma que en las dunas, o sea la dirección unilateral de la erosión.

La actividad erosiva de los heleros se manifiesta aún a través de otros matices morfológicos más interesantes

por su magnitud que aquellas formas esculturales de detalle.

En primer lugar es muy característico el modelado en forma de *circo*, propio del campo de alimentación del glaciar en las altas montañas. Se trata de hoyas semejantes a las cuencas de recepción de los torrentes, pero de fondo plano y paredes circunvalantes verticales y escarpadas. El fondo, además, aparece accidentado por rocas aborregadas, pulimentadas y estriadas, entre las cuales quedan ligeras depresiones u hondonadas excavadas por el hielo y que, al retirarse éste, quedan convertidas en cubetas lacustres.

No menos potente es la acción del hielo en la configuración de los valles glaciares. En sentido transversal se aprecia una tendencia al ensanchamiento progresivo, debido a que la lengua del glaciar rellena hasta bastante altura (a veces más de 100 metros) todo el valle, y, por consiguiente, la erosión no se reduce al hilillo de agua de los cursos fluviales, sino que alcanza toda la anchura de aquél, en una zona muy amplia. Por eso el perfil de esta clase de valles es en forma de *artesa* o de *herradura*. En cambio, en los valles fluviales, el perfil en *U* del glaciar pasa a ser en *V* (fig. 55).

La excavación no es igualmente intensa a lo largo del curso, ya que el poder erosivo del glaciar depende de la pendiente del cauce primitivo y de la masa de hielo que circula por él. Estos dos factores varían por circunstancias diversas durante el trayecto. En las confluencias de dos glaciares se acumula una gran masa que tarda algún tiempo en deslizarse, con lo cual aumenta súbitamente el poder erosivo; por esta causa, el glaciar, en estos sitios, ahonda mucho el cauce y se produce una excavación más profunda que en el resto del curso (*sobreexcavación*, *surcreusement* en francés). Estas cubetas o depresiones del cauce glaciar pueden originarse de la misma manera por exageración de las irregularidades del curso primitivo; en efecto, por encima de un roquedal que accidenta el suelo, se forman en la lengua del glaciar grietas transversales que disminuyen el espesor del hielo y, por tanto, su poder erosivo; con esto, el saliente es atacado con menor intensidad que el resto del valle. Así, la acción erosiva del hielo tiende, pues, a exagerar las irregularidades del cauce primitivo, por lo cual éste no alcanza nunca la pen-

diente regular y continua del *thalweg* fluvial, sino que,

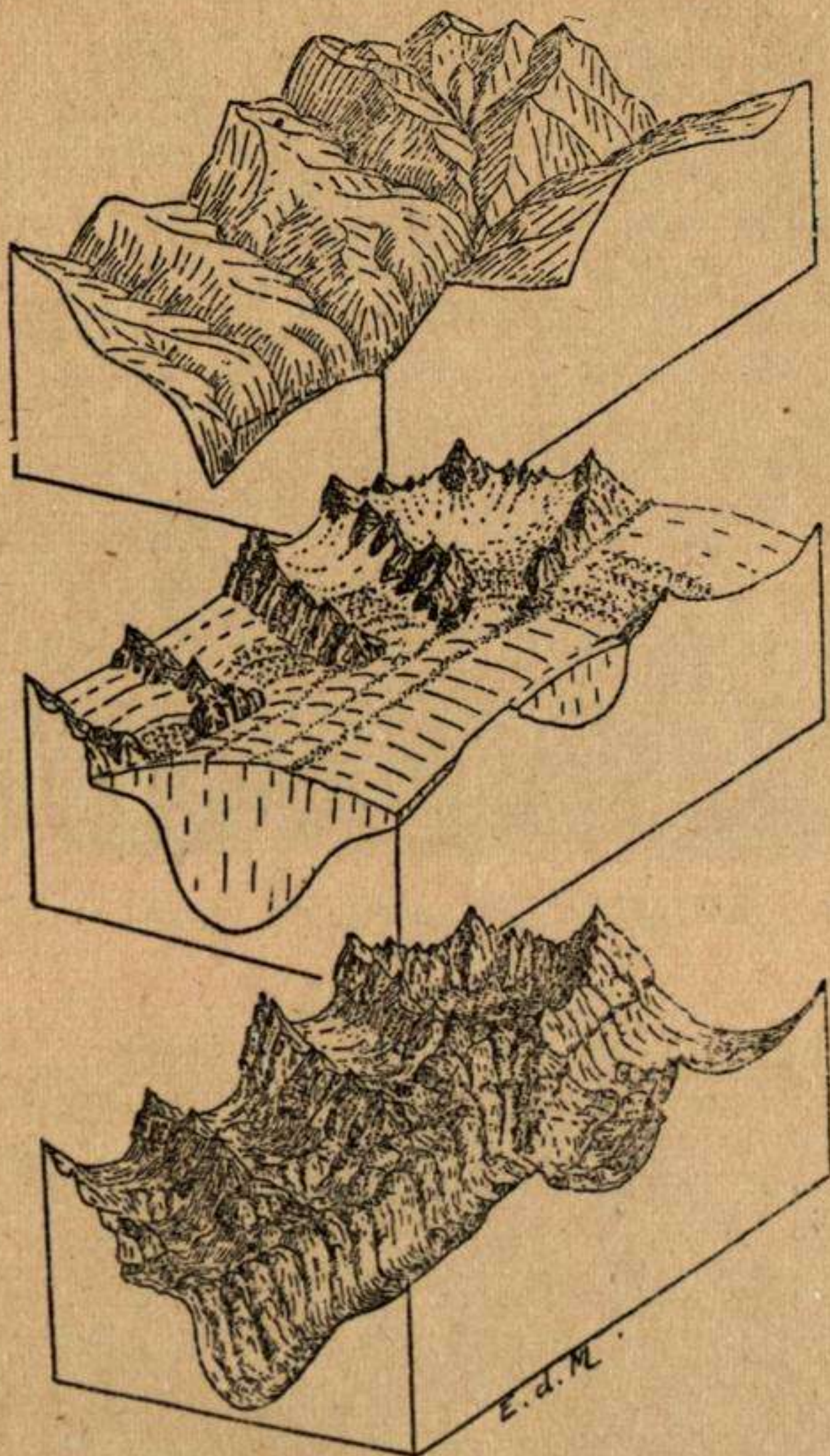


Fig. 55.—Formación del modelado glaciar (cauce en U) a expensas de un antiguo valle fluvial (cauce en V) (Martonne). Obsérvense los escalones (*gradin*) que separan el circo glaciar del fondo del valle en artesa.

por el contrario, se caracteriza por la repetida alternancia de escalones y rellanos. Si por un aumento pos-

ferior de la temperatura el glaciar se retira, estos rellanos sobreexcavados son asiento de lagos alargados y sinuosos que se amoldan al antiguo curso de la lengua glaciar. Estos lagos pueden también producirse a causa del taponamiento del valle por las morrenas frontales. En el Pirineo y en los Alpes existen infinidad de ejemplos de estos tipos de lagos glaciares, algunos de los cuales han sido ya colmatados por los aluviones y convertidos en fértiles planicies.



## MODELADO GLACIAR



FIG. 1. — Lago y circo glaciares, de Saboredo (Pirineo catalán).

(Foto. Zerkowitch)



FIG. 2. — Antiguo valle glaciar en la cuenca del rio Valira (Andorra).

(Foto. Solé)



FIG. 1. — Granito pulimentado y estriado por la acción glaciaria, en el valle del Esera (Aragón).

(Foto. Solé)



FIG. 2. — Rocas aborregadas en Benasque, valle del Esera (Aragón).

(Foto. Solé)

## CAPITULO XII

### ACCIÓN GEOLÓGICA DEL MAR

#### Movimientos del mar

El agua del mar aparece agitada y en perpetuo movimiento; unas veces se trata de verdaderas traslaciones de masas oceánicas, las *corrientes marinas*, de recorrido constante o periódico; otras veces son oscilaciones rítmicas, como el *oleaje* y las *mareas*, que alteran periódicamente el equilibrio de la superficie de las aguas.

Interesa a la Geología conocer la forma en que se desarrollan tales movimientos, por ser las fuerzas que actúan en las costas sobre el relieve continental, modificándolo profundamente, ora para atacarlo enérgicamente, ora para construir importantes formaciones sedimentarias a expensas de los derrubios que arrastran.

Las *corrientes marinas* vienen a ser verdaderos ríos o cursos de agua dentro del mar; la causa de estos desplazamientos radica en la fuerza desarrollada por el viento que, haciendo presión sobre la superficie de las aguas, determina un movimiento de agitación en el mismo sentido que la corriente eólica; influyen también las diferencias de temperatura y salinidad, que determinan corrientes que tienden a nivelar estas desigualdades. La acción geológica desempeñada por las corrientes marinas es de importancia, por cuanto es uno de los agentes que más activamente intervienen en la traslación de los derrubios arrojados por las aguas continentales o de los que el mismo mar se procura corroyendo las costas. Además de esta acción constructiva, las corrientes marinas desempeñan muchas veces una importante acción demoledora del relieve costero, pues al rozar continuamente con el roquedo litoral, sobre todo si éste es de escasa coherencia, arenas, arcillas, etcétera, arrastra consigo las partículas de tierras y es capaz de hacer desaparecer extensas planicies aluviales.

*El oleaje.*—Es el conocido movimiento de ritmo rápido que riza incansablemente la superficie de las aguas. Las ráfagas eólicas, al golpear con furia la masa líquida, provocan la agitación del mar, que se propaga describiendo un movimiento ondulatorio, de la misma manera que la piedra o el golpe dado con un palo sobre el agua de un estanque produce un sistema de ondas que se transmite por toda la superficie del lago.

Las olas obran a la manera de potente ariete, estrellándose con furia contra los acantilados; los fragmentos rocosos arrancados los transporta a lugares de aguas menos agitadas, originando notables depósitos en muchos sitios de la línea de la costa; por su universalidad y por su brusco desarrollo energético es el agente de mayor importancia en el modelado del litoral.

Finalmente, las *mareas* consisten en levantamientos y hundimientos periódicos del nivel de las aguas del mar, que por esta causa avanzan (*pleamar*) o retroceden (*bajamar*) sobre el continente. La razón determinante de tal fenómeno es la atracción lunar; en veinticuatro horas, o sea en una rotación completa de la Tierra, en cada costa hay dos pleamares y dos bajamares, que se suceden con períodos de seis horas. El papel geológico de las mareas consiste principalmente en ensanchar la zona afectada por el oleaje; esta franja anfibia alcanza en los mares abiertos e importantes varios kilómetros; en cambio, en los mares cerrados sin mareas importantes, la zona de costa removida por el oleaje se reduce a una franja muy estrecha de pocos metros de amplitud.

### Acción geológica del mar

En virtud de la acción combinada del oleaje, las corrientes y las mareas, las aguas marinas ejercen una importante labor geológica. Por una parte, el oleaje rompe contra los acantilados, los socava y termina por desplomarlos, arranca materiales de las rocas incoherentes y los transporta a distancias considerables, depositándolos en los parajes donde decrece la fuerza del oleaje o de las corrientes. Por otra parte, los derrubios, que en cantidades fabulosas le aportan las aguas continentales, entran en el dominio de las corrientes, que se encargan de repartirlos por las costas o de arrastrarlos mar adentro, hasta que por su propio peso

caen al fondo, en donde constituyen los depósitos marinos sedimentarios, cuya importancia en la estructuración de la Tierra ha sido ya estudiada. De aquí resulta, pues, que el mar realiza un trabajo doble y en cierto modo complementario: destruye las puntas y los

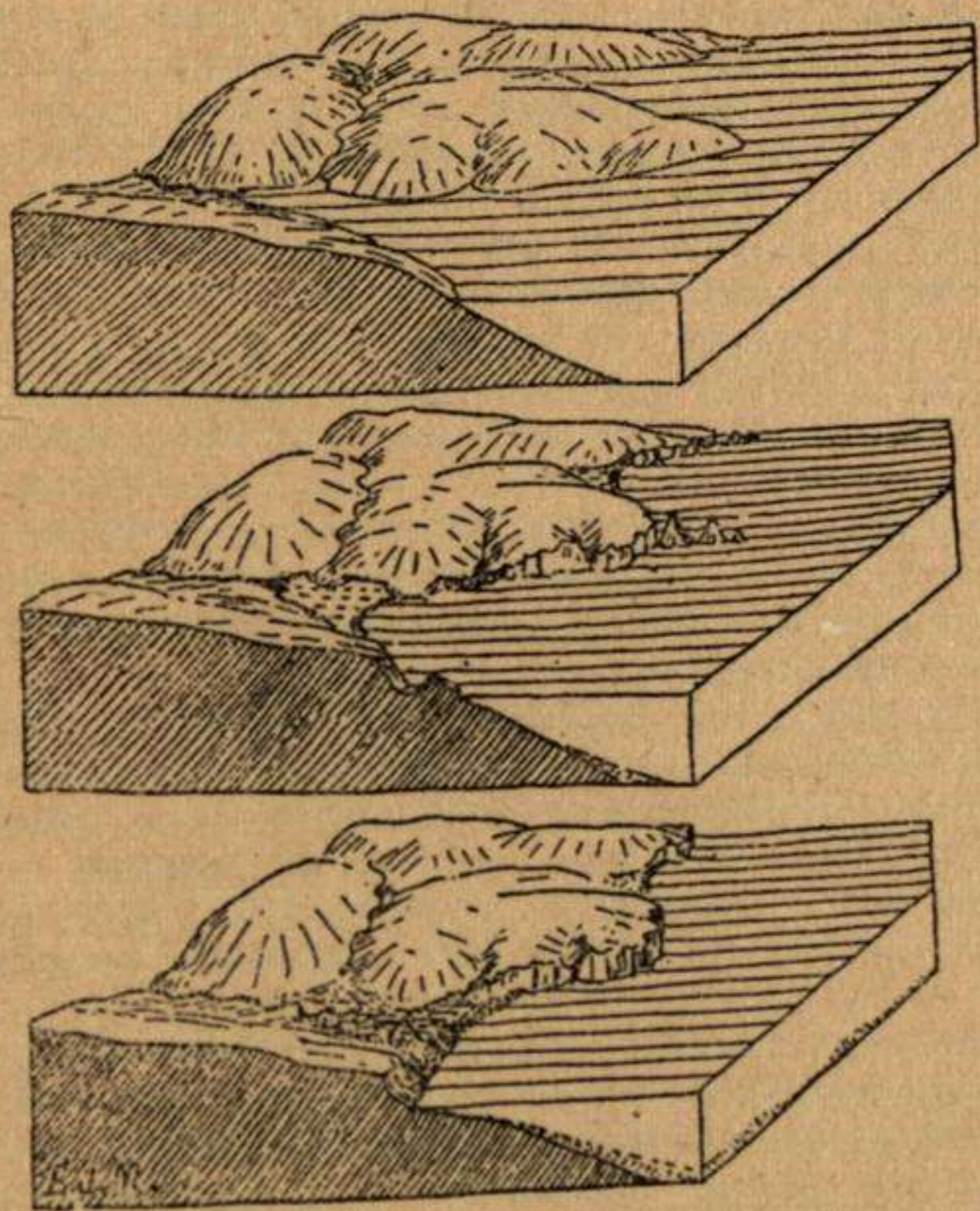


Fig. 56.—Evolución del perfil litoral (Martonne).

promontorios salientes del relieve continental, mientras por otra parte construye con estos derrubios nuevos sedimentos en las bahías y ensenadas de aguas tranquilas.

De este doble juego constructivo y destructivo resulta forzosamente una regularización del perfil costero; al propio tiempo que retroceden los salientes son rellenados los entrantes, con lo que las costas muy recortadas pierden su perfil articulado hasta llegar a tener un tra-

zado rectilíneo o ligeramente sinuoso. La forma del perfil resulta, pues, un índice seguro para reconocer el estado evolutivo de las costas; las muy articuladas son siempre costas jóvenes, mientras los relieves litorales seniles son casi siempre rectilíneos o ligeramente ondulados (fig. 56).

*Acción destructora.*—La actividad pura y simple del oleaje acaba creando siempre una costa acantilada. En efecto, las olas desarrollan una energía poderosa (en Escocia, rompen los gruesos vidrios de los faros situados a 100 metros de altura sobre la costa), que, al batir contra el roquedo litoral, arrancan pequeños fragmentos que son nuevamente arrojados como metralla y aumenta su potencia erosiva; el relieve costero es atacado por su base, produciéndose un socavón que, cuando alcanza cierto desarrollo, acaba provocando el derrumbamiento del techo. Si se trata de rocas poco coherentes, arcillosas o margosas, los deslizamientos se producen continuamente y de una manera lenta, partícula a partícula, dando lugar a declives menos acentuados que si se trata de rocas duras.

En todo caso, los derrubios que se acumulan al pie del cantil son molidos por el oleaje, y a medida que se desmenuzan y disminuyen su calibre son arrastrados mar adentro por el mismo vaivén de las olas o por las corrientes marinas. Así las olas pueden seguir rompiendo contra la escarpa costera, obligándola a ceder nuevamente.

Sin embargo, el retroceso del acantilado tiene un límite impuesto por la propia erosión marina. Observemos que el acantilado sólo retrocede por encima de la rompiente de las olas, pues por debajo de ellas el poder erosivo del mar es casi nulo; así, a expensas del antiguo acantilado y con la nivelación de los salientes del litoral, se forma a pocos metros de profundidad una superficie plana ligeramente inclinada hacia el mar, que recibe el nombre de *plataforma de abrasión*, y que emerge en buena parte durante la marea baja. En pleamar, las olas, antes de romperse contra los cantiles rocosos, se restriegan sobre los bajos fondos de la plataforma de abrasión, con lo cual pierden buena parte de su energía.

En la figura 57 puede verse cómo, a causa del declive de la plataforma de abrasión ( $c' b'$ ), el retroceso tiende

a un límite, y, una vez detenido, el arroyamiento se encarga de degradar los cantiles convirtiéndolos en declives menos acentuados ( $AB$ ,  $ab$ ,  $a'b'$ ). Sólo en caso de

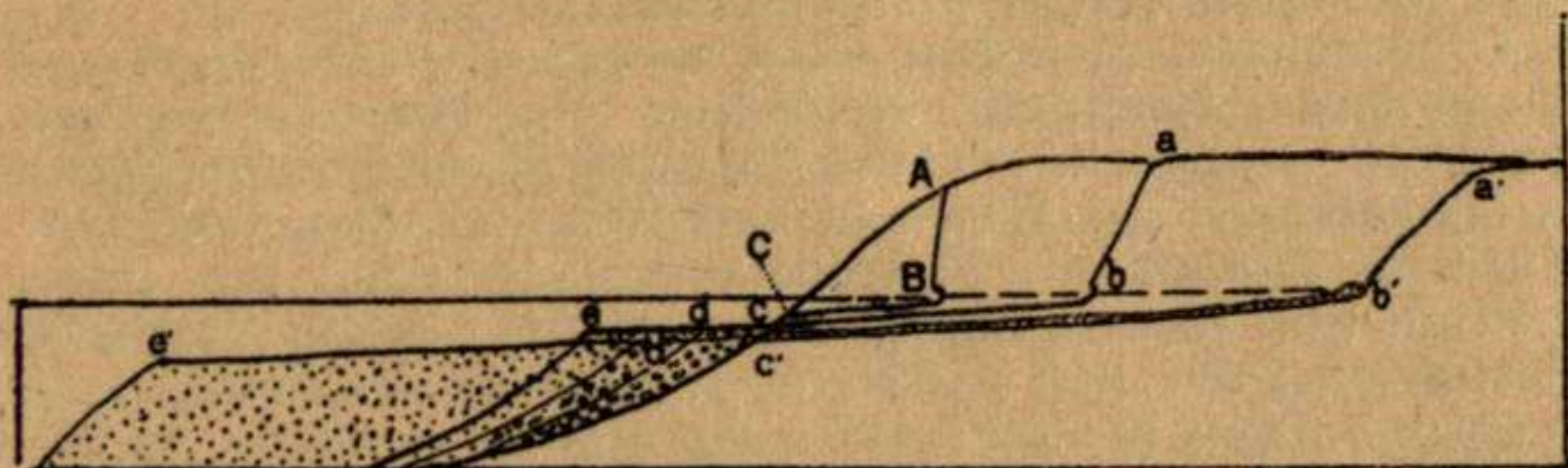


Fig. 57.—Retroceso de los acantilados y formación de la plataforma (Martonne).  $c' b'$ , plataforma de abrasión; el espacio punteado representa la plataforma de acumulación.

que el nivel marino se eleve es posible que el retroceso siga ininterrumpidamente y que la plataforma de abrasión alcance en este caso una enorme extensión. Así se explican las formaciones de las grandes plataformas continentales que bordean algunos continentes, como la del mar del Norte, que a unos 200 metros de profundidad une Inglaterra con el resto de Europa.

De la misma manera, pues, que los movimientos epigénicos hemos visto que son capaces de acelerar o retrasar el ciclo evolutivo fluvial, ejercen también su influencia en el modelado costero; una costa de hundimiento aparece siempre con el aspecto juvenil, mientras que una costa estable o en proceso de emersión adquiere mucho más rápidamente las características de las costas seniles.

*Acción constructora del mar. Formas de acumulación.*  
—Los materiales arrancados por el oleaje son removidos y arrastrados por la resaca y las corrientes marinas; los bloques de piedra redondean sus ángulos, las partículas de tierra más finas son arrastradas mar adentro, y cerca de la costa, en los sitios donde el oleaje y las corrientes pierden virulencia, se forman acúmulos de cantos rodados, guijos y arenas de distinto grosor, constantemente removidos por las olas. Estos bancos detríticos se forman sobre todo en las aguas encalmadas y protegidas por estar entre dos promontorios salientes; son de forma arqueada y reciben el nombre de *cordón lito-*

ral. Son de perfil disimétrico, con el flanco abrupto dirigido hacia adentro en sentido contrario al del movimiento del oleaje, y con el flanco de pendiente suave que llamamos *playa* dirigido hacia el mar.

Otras veces, esos depósitos surgen a cierta distancia de la costa, formando en el mar una *barra* o *restinga* paralelo a aquélla. Pronto los derrubios continentales o las mismas aportaciones marítimas acaban fusionando estos bancos con el continente, quedando por algún tiempo una laguna cerrada con algún portillo estrecho (*grau*, en Provenza y Cataluña; *grao* en Valencia), que comunica con el mar; estas lagunas se conocen en España con el nombre de *albuferas* (fig. 60).

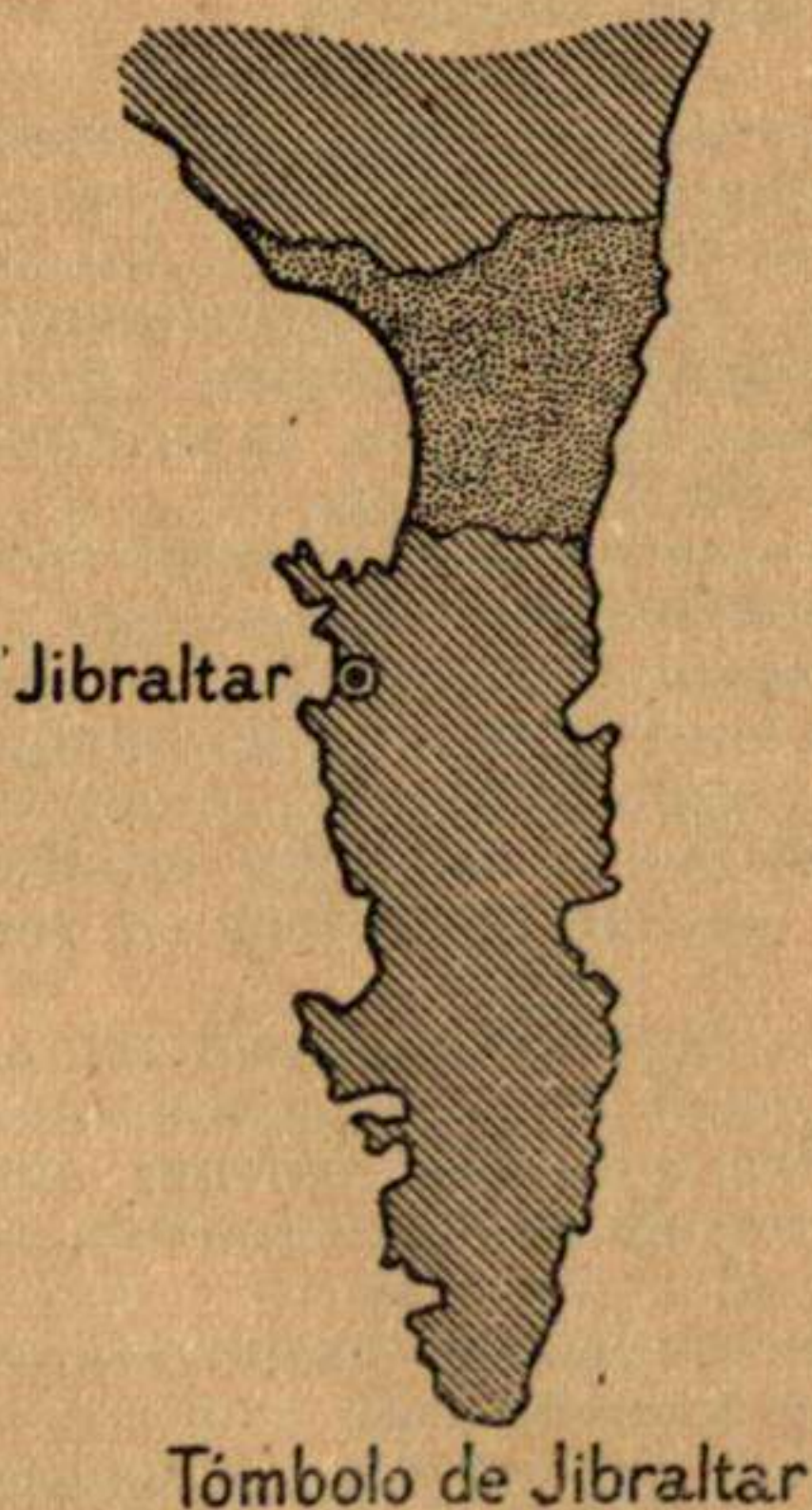


Fig. 58.—Tómbolo de Gibraltar. El espacio punteado representa el cordón de arena.

Los estrechos que resultan entre los islotes y la costa cercana quedan de ordinario protegidos del embate de las olas, por lo cual se deposita pronto allí un cordón de arenas que forma una lengua de escasa anchura que une en poco tiempo las rocas insulares con el litoral. Es la forma de acumulación llamada *tómbolo* (vocablo tomado del italiano), que tanto abunda en las costas rocosas en estado avanzado de evolución. Gibraltar, Peñíscola y San Sebastián se insinúan sobre un tómbolo de situación estratégica. Cuando el cordón de arenas se apoya en un saliente rocoso de la costa y termina libremente en el mar recibe el nombre de *flecha* o *espiga* (fig. 59).

Los derrubios que forman las costas de acumulación proceden exclusivamente del arranque efectuado por la erosión del



mar, pero de ordinario coopera también de una forma muy activa el aluvionamiento continental. Éste alcanza su máximo valor en la desembocadura de los ríos, en donde los depósitos fluviales se acumulan formando las llanuras de forma triangular denominadas *deltas* (de la letra griega delta); en realidad, el delta no es otra cosa que un cono de deyección fluvial depositado en el mar.

Los deltas de los grandes ríos alcanzan considerables extensiones. El del Ganges, en la India, tiene 80.000 kilómetros cuadrados de superficie, y el del Nilo, 22.000. Sus formas de detalle son muy variadas y dependen de la mayor o menor cantidad de detritos arrojados por el río y del régimen de éste. En los ríos poco caudalosos, como las aportaciones de materiales no son abundantes, el delta progresa lentamente y el río tiene un solo cauce. En cambio, en los ríos muy caudalosos y de régimen torrencial, las aguas se desbordan, el cauce se ramifica, y el delta avanza velozmente. Como ejemplo de delta triangular simple tenemos el del río Llobregat, en Cataluña, que avanza poco más de 1 metro por año; el del Ebro, río más caudaloso, presenta dos brazos, y su progreso es próximo a 10 metros anuales; en el Po, de delta digitiforme, el avance es de 70 metros, y de 90 metros en el Missisipí (fig. 60).



Fig. 59.—Flecha o espiga en progresión.

### Tipos de costas

El modelado costero depende de dos factores en cierto modo independientes: del relieve continental y de las condiciones en que se desarrolla la acción erosiva del mar. Se comprende que, según se trate de terrenos llanos o montuosos, la forma de las costas será muy diferente; en los primeros predominan las formas de

erosión, y en las segundas las de acumulación, pues las olas llegan a la costa después de haberse deslizado sobre un plano ligeramente inclinado en donde pierden casi todas sus energías. En cuanto a la acción geológica del mar, sabemos que sigue un proceso evolutivo fatal, que tiende a igualar las primitivas diferencias que en la costa pudieran existir; pero ese proceso puede ser activado o retardado por movimientos de emersión o de sumersión del litoral. Del acoplamiento de estos diversos factores en cada caso surge la forma del relieve costero; no es difícil, pues, entrever la complejidad de formas a clasificar.

Según sea de accidentado el relieve continental bañado por el mar, las formas litorales se dividen en dos grupos: *costas bravas* o acantiladas, fuertemente batidas por el oleaje si no han llegado todavía a su fase de madurez, y *costas bajas*, arenosas o de relieve poco acentuado, en las que predominan las formas de acumulación, tómbolos, barras, albuferas, alfaques, etc.

*Costas bravas.*—El perfil de las costas bravas depende principalmente de la estructura y orientación del relieve montañoso en relación con el trazado del litoral. Si las líneas directrices del relieve corren normalmente a la costa (*costa transversal*), los entrantes y salientes son muy numerosos y profundos; los macizos interiores se prolongan mar adentro formando digitaciones alargadas, normales a la costa, entre las cuales se albergan profundas bahías muy alargadas. Es el caso del litoral griego en el mar Egeo o el de la península de Anatolia.

En cambio, cuando las cordilleras arrumban paralelamente al litoral, la costa es rectilínea y muy escarpada; el mar penetra alguna vez en el interior por estrechos portillones transversos, expansionándose en cuanto alcanza algunos de los valles interiores alargados paralelamente a la costa. Es el llamado tipo de *costa longitudinal*, que, por presentarse espléndidamente desarrollado en Dalmacia, se conoce también con la designación de *costa dálmata*. El litoral californiano es un buen ejemplo de este tipo de costas.

La forma del perfil costero depende, además de la estructura, de las circunstancias morfológicas del relieve continental. Así los macizos montañosos en vías de hundimiento dan lugar a *costas de rias* si el modelado interior obedece a la red hidrográfica normal y a

*costas de fiordos* si se trata de relieve glaciario. En ambos casos, el trazado del litoral en el plano es casi idéntico, resolviéndose la costa en una serie de ricas articulaciones sumamente ramificadas hacia el interior siguiendo una curva de nivel del antiguo valle sumergido. Pero en el primer caso, el perfil transversal en V del valle fluvial da lugar a costas suavemente inclinadas, mientras en el segundo caso el perfil en U del valle glaciario origina paredes acantiladas.

*Costas bajas.*—Presentan también gran variedad de formas. En ellas predominan los procesos constructivos, pues ordinariamente las olas rompen sobre las playas después de haber gastado casi todas sus energías restregándose contra el suave declive que prolonga la llanura costera mar adentro.

En las costas bajas, desde mucho tiempo estabilizadas o afectadas por un lento movimiento emergente, los procesos constructivos son muy rápidos y el relieve costero llega muy pronto a su fase de madurez. Los sedimentos se esparcen a lo largo de la costa formando una *llanura litoral*, prolongada mar adentro por el continuo progreso de tómbolos, deltas, cordones litorales, flechas y restingas, cuyo avance facilitan, además, las continuas aportaciones continentales, ya sea acumulándose en la desembocadura de los ríos para formar los deltas, ya sea dilatándose en ancha franja al impulso de las corrientes marinas.

La evolución y modelado de este tipo de costas es muy característico y se presenta en fase muy avanzada en los mares cerrados, donde las mareas no tienen ya fuerza para remover y llevarse mar adentro los sedimentos depositados cerca de las playas. El crecimiento continuo de flechas y restingas señala, al salir a flor de agua, el colmataje de la plataforma costera sumergida; con su progreso se aíslan porciones de mar que primero forman cuencas semiabiertas como los alfaques, pero que pronto derivan hacia formas cerradas como las albuferas, atravesadas solamente por los pasos estrechos o graos abiertos en la restinga. Al cabo de algún tiempo, las albuferas son colmatadas, se convierten en marismas de aguas pantanosas y, finalmente, acaban desecándose del todo. La costa que se extiende a los lados de la desembocadura del Po, en Italia, con la gran albufera veneciana cuya entrada defiende el puerto

de Lido, es un magnífico ejemplo tipo de este género de costas, que reciben el nombre de *lidos* en el lenguaje científico internacionalizado, pero que también pudieran designarse con el español de *albuferas*.

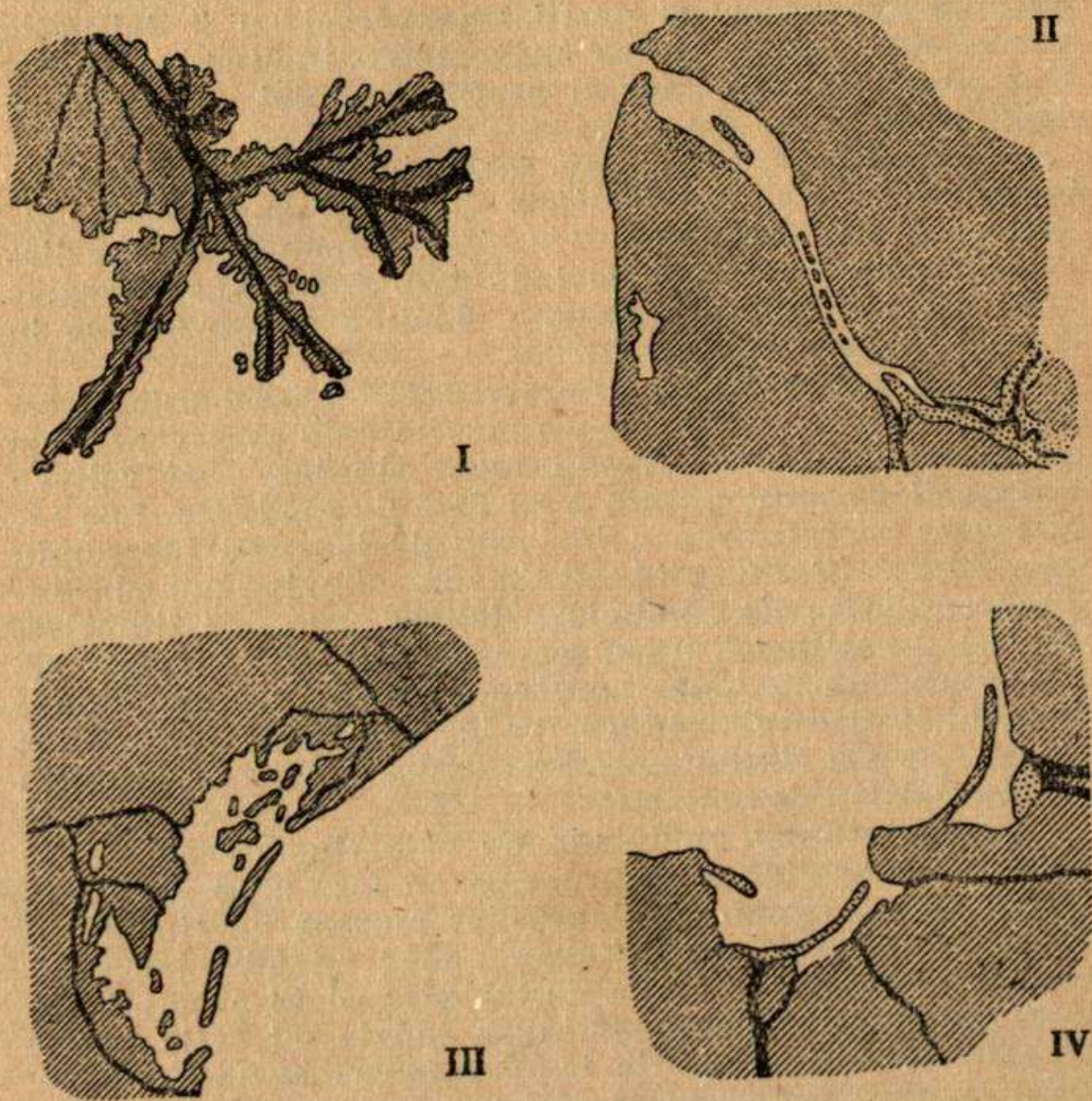


Fig. 60.—Tipos de costas bajas. I, delta del Mississipi. II, estuario del Gironde. III, albufera de Venecia. IV, limans de Prusia Oriental.

En las costas bajas muy jóvenes y especialmente en las de hundimiento, se presenta otro tipo de costas bastante diferente. Los rios no llegan a formar deltas, ya que los sedimentos que arrastran no llegan casi nunca

DESEMBOCADURAS FLUVIALES



FIG. 1. — Delta del río Ebro.

(Geografía Gallach)



FIG. 2. — Ría de Pasajes (San Sebastián).

(Foto. Galarza)

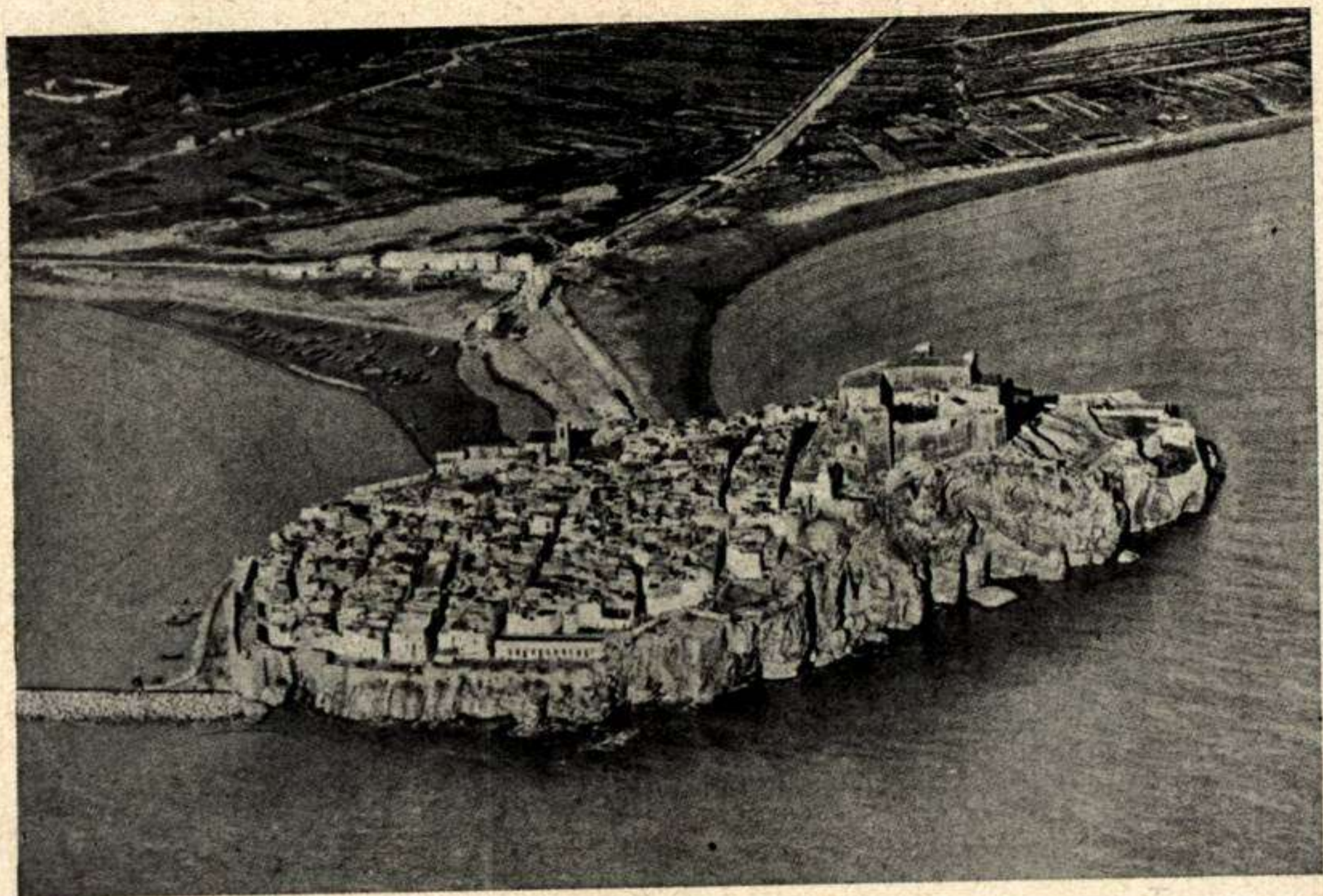


FIG. 1. — Tómbolo de Peñíscola.

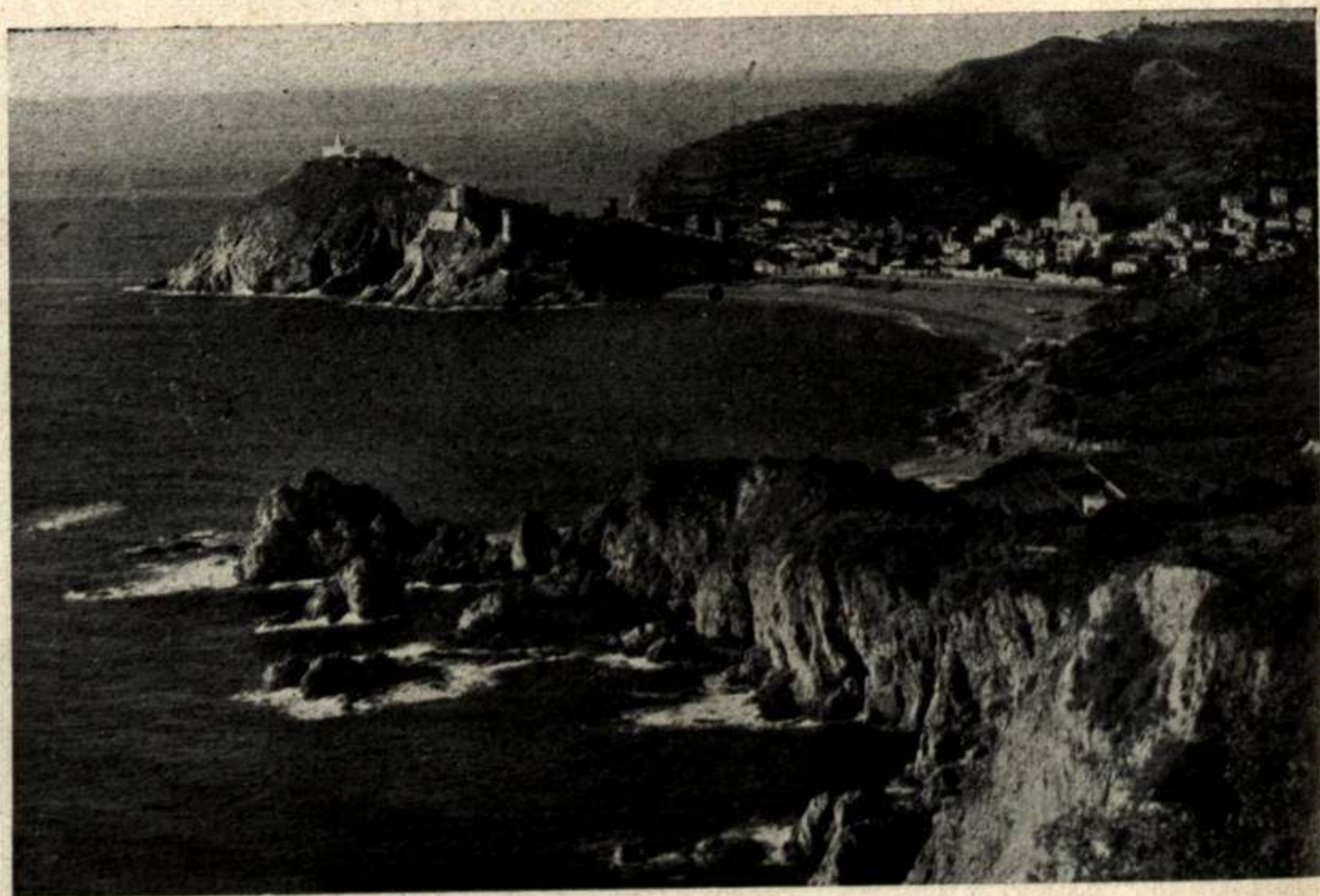


FIG. 2. — La Costa brava catalana en Tosa de Mar.

a aflorar a la superficie, sino que desembocan en el fondo de bahías de forma triangular o en embudo, que reciben el nombre de *estuarios* o *esteros*. (Ejemplos de ello son la desembocadura del río Tinto y la del Guadiana, en España; el estuario del Gironda en la desembocadura del Garona; el Elba, etc.). Las costas son algo más recortadas que en el tipo anterior, pues dibujan la pequeña accidentación del relieve continental. Los sedimentos continentales se acumulan en la desembocadura de los ríos importantes formando una barra que cierra una gran laguna triangular que difícilmente llega a colmatarse a causa de la sumersión. Son los «*Haffen*», que tanto abundan en la costa alemana del Báltico, en la desembocadura del Tajo y en las costas de Maryland, en los Estados Unidos del Norte de América, y en general en las costas bajas de los mares sometidos a mareas intensas. Se designan también con el nombre de costas de *limans*.

Cuando una costa en vías de sumersión se estabiliza, se aceleran los procesos constructivos sedimentarios; de esta forma, los estuarios y rías pueden pasar a la fase déltica, que representa, en último término, la fase final senil en el proceso evolutivo de las desembocaduras fluviales.

## CAPÍTULO XIII

### ACCIÓN GEOLÓGICA DE LOS SERES VIVOS

Los seres vivos no se limitan a ser simples espectadores en la constante labor de transformación de la faz de la Tierra. Por el contrario, su intervención es más intensa y eficaz de lo que pudiera parecer al compararla demasiado a la ligera con la espectacular actuación de las fuerzas endógenas y exógenas; ya que no solamente son un elemento importante en el modelado de la superficie terrestre, sino incluso en la constitución de las rocas de la litósfera. Baste considerar el valor fisiográfico y aun económico de las cuencas hulleras y petrolíferas y la extensión del número fabuloso de islas y formaciones, algunas de varios centenares de kilómetros de longitud, constituídas por los corales que viven en aguas del Pacífico.

El campo de acción de los organismos vegetales y animales se halla bastante bien delimitado; los primeros ejercen su influencia más intensa y destacada en los continentes; los segundos realizan su trabajo principal en el ambiente oceánico.

#### Acción destructora de los organismos

La labor demoledora de los vegetales se verifica en dos sentidos: mecánico y químico.

En el primer aspecto, las raíces de las plantas de mayor desarrollo penetran por los intersticios y resquebrajaduras de las rocas, y, en su crecimiento, obran como cuñas que rompen y trituran hasta los bloques más resistentes; su papel es parecido al de las plantas, como la hiedra, que se desarrollan sobre los edificios viejos.

En el campo de las acciones químicas, cabe pensar en la que compete al anhídrido carbónico como agente



de la meteorización que forma parte de la atmósfera. Más intensa, todavía, es la que corresponde a las infinitas bacterias y hongos de la tierra que, mezclados con el humus procedente de la putrefacción de las plantas, corroen las rocas y contribuye a la formación del suelo de cultivo.

El cometido destructor de los animales se ejerce principalmente en los continentes y consiste en trabajos de excavación y remoción del suelo llevados a cabo por topos, lombrices, conejos y otros animales terrícolas, por el que se desbroza el camino de los otros agentes erosivos, particularmente del viento.

### Acción constructiva de los vegetales

Una vegetación tupida constituye un eficaz elemento de defensa que neutraliza en buena parte el arroyamiento del suelo; las raíces se entrecruzan, cohesionan y traban las tierras que las sostienen, y con ello evitan sean arrastradas por los agentes denudadores. Pero, además de esta acción meramente pasiva o de protección, las plantas ejercen una destacada actividad constructiva.

Por acción química separan el hierro de las sales ferruginosas que el agua contiene en disolución y lo depositan en los fondos lacustres; por el mismo procedimiento, las sales calcáreas se depositan alrededor de los tallos, que quedan como manojos de tubitos petrificados cuando muere la planta, formando las *toscas*, *tobas calizas* y *travertinos*.

Pero el papel más importante radica en la formación de los carbones naturales. Entre los estratos de la corteza terrestre afloran densas capas de rocas carbonosas, distinguiéndose, según su riqueza en carbono, una serie de términos que, en orden decreciente, son: *antracita*, *hulla*, *lignito* y *turba*, en el último de los cuales la masa vegetal originaria apenas si ha sufrido ligeras transformaciones.

Las hullas y antracitas pertenecen a las sedimentaciones más antiguas; aparecen entre las rocas detríticas continentales del período, por esta razón llamado carbonífero, de la Era Primaria, y contienen del 75 al 98 por 100 de elemento combustible. Los lignitos son carbones más recientes; se asientan en terrenos secunda-

rios y terciarios, y son menos ricos en materia combustible (55-75 por 100 de carbono). Las turbas son los sedimentos carbonosos más modernos; algunos se forman a nuestra vista, y tienen, en general, poco alcance calorífico (50 por 100 de carbono).

Los carbones se deben a la putrefacción de los vegetales en presencia del agua y a la falta de aire en cantidad suficiente para descomponerlos totalmente. Las transformaciones que sufren las materias orgánicas vegetales hasta convertirse en combustible, son debidas a las bacterias que pululan en el suelo y producen una fermentación parecida en un todo a la alcohólica; pero mientras, en este caso, el azúcar de las uvas, por ejemplo, se convierte en alcohol, en aquel otro la fermentación consiste en la transformación de la celulosa y otros productos vegetales en sustancias carbonosas. Este proceso fermentativo comienza por una maceración de las materias vegetales, que facilita el desdoblamiento de los hidratos de carbono (celulosa, lignina, etc.) en anhídrido carbónico procedente de la respiración microbiana y en hidrocarburos sólidos, líquidos y gaseosos que se acumulan en el suelo. Finalmente, los ácidos originados durante el proceso fermenticio anulan la vida de los microorganismos haciendo estéril el medio, y con eso cesa la fermentación. Según que la esterilidad del medio se alcance más o menos temprano, se obtiene hulla, lignito o turba.

Veamos ahora las condiciones en que pudieron vivir y desarrollarse las plantas que originaron tales depósitos. La hulla tiene sus raíces en los frondosos bosques de gigantescos helechos, coníferas y otras especies arbóreas y herbáceas que ornaron los continentes en el crepúsculo de la Era Primaria; los lignitos se derivan de las fuertes acumulaciones de cipreses pantanosos que verdeaban al final del período secundario y en el transcurso de la Era Terciaria. Para que sean posibles esos tupidos mantos de vegetación se requieren ciertas condiciones climáticas de calor y humedad y abundancia de abonos naturales.

Las heladas invernales entorpecen el desarrollo de las plantas, mientras que el calor excesivo, si bien favorece un rápido crecimiento, en cambio acelera la putrefacción y destrucción total de los vegetales. (Las traviesas, no impregnadas, de los ferrocarriles mexicanos, por

ejemplo, a causa del calor tropical, tan sólo duran de diez a doce meses.) En terrenos áridos y secos, la vegetación es escuálida y raquítica, pues la lozanía de la flora exige un contingente de humedad constante, esto es, un régimen de lluvias frecuentes durante todo el año (regiones tropicales y templadas de clima oceánico). Así, pues, para las formaciones hulleras y ligníferas, debió de existir un clima templado y húmedo, exento de fuertes heladas, parecido al que actualmente se ofrece en la región atlántica, en el Mediodía de Francia o en el Norte de la Península Ibérica. A este respecto cabe desechar el mito de la temperatura tropical para la oclusión de las capas de hulla; solamente en el caso de grandes inundaciones con la acción pertinaz del aire interpuesto en los mantos de arcilla, cabría pensar en la posibilidad de un sedimento carbonoso, tanto en los tiempos antiguos como en los actuales, en la zona de los trópicos.

Además, el origen de las capas carbonosas parece ser concomitante con los grandes paroxismos orogénicos, pues los períodos de exuberancia vegetativa suceden a los plegamientos importantes y a las irrupciones de masas volcánicas que éstos originan; así por lo menos es evidente para las formaciones carboníferas de la Era Primaria desarrolladas después de la formación de las llamadas cordilleras hercinianas. Con la erección de relieves potentes aumenta el dominio continental, y se espolea la actividad de los agentes erosivos; enormes cantidades de derrubios jóvenes no agotados invaden valles y llanuras, riberas y deltas, y particularmente las costas. En estas acumulaciones abundan detritos procedentes de las masas jóvenes emergidas y de las rocas volcánicas acabadas de expulsar, los cuales facilitan la potasa, la cal y el ácido fosfórico que necesitan los vegetales para un extraordinario desarrollo. Igual exuberancia se observa hoy en los parajes de condiciones análogas a las descritas.

La turba es el único carbón de formación actual o el derivado de un proceso fermenticio antiguo que no llegó a cuajar. Por eso su estudio ofrece la oportunidad de seguir las circunstancias que debieron de concurrir en la época de formación de las hullas y lignitos. Los lugares donde actualmente se producen aquellas acumulaciones carbonosas se llaman *turberas*, *turbales*, *tollas*,

*tolladeros, paúles o paulares*, según las regiones españolas. Estos sitios exigen, al igual que para la formación de la hulla y el lignito, una vegetación tupida, humedad abundante y gran cantidad de elementos nutritivos; pero, en cuanto a temperatura, los turbales se forman casi únicamente en regiones templadas frías, y sólo por excepción en climas subtropicales como en el delta del Ebro.

La turba afluye en lugares de aguas encharcadas, pantanosas o de poca corriente, como en las llanuras aluviales, deltas y mesetas montañosas húmedas, en donde la vegetación se compone de algas, musgos (*Hypnum*, *Sphagnum*), brezos, juncos, cañizos y otras plantas semiacuáticas. La presencia del agua y de los microorganismos del cieno provoca la putrefacción de las partes inferiores sumergidas, que con el proceso fermenticio se convierten en turba, mientras las regiones superiores de las plantas continúan creciendo verdeantes y lozanas.

El producto de la fermentación adquiere primeramente un color pardo y una consistencia esponjosa, que se empapa de agua y poco a poco va tomando el tono negrozco de la turba, cuya masa invade con el tiempo toda la depresión en que se asienta. En tanto no se llega a este último estado, es sumamente peligroso el tránsito, tanto para las personas como para los animales, por la posibilidad de hundirse y desaparecer entre la turba esponjosa. Aunque no sea en tal extremo, el piso del turbal tiembla siempre como si fuera un suelo flotante. En los casos óptimos, los turbales alcanzan, como en Holanda y Alemania, de dos a trece metros de espesor.

En la mayoría de las cordilleras españolas existen formaciones de turba en actividad, y de un modo particular en los Pirineos atlánticos y en los extensos depósitos del delta del Ebro.

### Acción constructiva de los animales

El valor constructivo de los animales en los continentes es casi nulo; en cambio, en el ambiente marino, el papel edificador que les corresponde adquiere un realce extraordinario. A este respecto cabe recordar cómo han contribuido y contribuyen en cantidades fabulosas, con sus restos esqueléticos calcáreos y silíceos,

a la formación de los depósitos oceánicos; pero, además, en sus procesos vitales, ciertos organismos marinos segregan y acumulan espesores fabulosos de sedimentos calizos; así, por ejemplo, las llamadas calizas numulíticas de la Era Terciaria son formaciones que en el Pirineo alcanzan 500 metros y se deben a la actividad de foraminíferos de gran tamaño. Y en último término revisten interés especial los acúmulos de corales de los mares tropicales.

*Arrecifes e islas coralinas.* — «Un arrecife coralino o madreporico es una asociación de seres vivientes antes de convertirse en una masa sedimentaria. Desde la canoa que pasa rompiendo los tallos de los corales con un ruido semejante al que produciría si fueran de porcelana, ve el viajero agitarse sin cesar, bajo el agua maravillosamente transparente y en una penumbra azulada, los pólipos purpúreos, rosados, violáceos, pardos o verdes, como florecillas de cinco pétalos, abriéndose y cerrándose alternativamente, vivos e impresionables como la sensitiva de Oceanía. Alrededor pulula un mundo de comensales: peces provistos de espinas punzantes, langostas, cangrejos, moluscos de concha gruesa y dura, como las patelas, las haliotis, las cipreas y las madreperlas; grandes anémones de mar, inmensas tridacnas de manto coloreado y festoneado, a veces de un metro de anchura, y erizos de mar de largas púas violáceas. Hay también animales parásitos; unos, como los litodomas, gefirinos, anélidos y cirrípedos, roen la piedra y la perforan abriendo múltiples galerías; otros, «los devoradores de arena», balanoglosas y holoturias, digieren la caliza y la restituyen al mar en estado de blanco lodo coralino. Un arrecife es, pues, una cantera en formación y una cantera en demolición; y del predominio de una u otra tendencia resulta, como dice Gravier, el balance del arrecife. Si los pólipos constructores vencen, el arrecife emergerá sobre las olas y llegará a ser una isla. Si, por el contrario, a fuerza de ser minado por los organismos perforadores, se desmorona y desploma sobre sí mismo, quedará formando un banco medio sumergido, en el cual romperán las olas extendiendo su blanca espuma con un ruido sordo y repetido que los primeros navegantes acechaban ansiosamente durante la noche. En la construcción de un arrecife, el mencionado trabajo de los seres vivientes,

es solamente preparatorio; el verdadero arquitecto es el océano. Este es el que, a medida que se eleva la masa porosa y recortada, la consolida con la acumulación de toda suerte de despojos: piedras rotas, conchas de moluscos, caparazones de crustáceos, púas de erizos, etc. Todos los animales que viven en lucha perpetua son asociados por la muerte a una obra común: el arrecife es una necrópolis.»

A esta pintoresca descripción (1), tan sólo cabe añadir que las formaciones madreporicas únicamente son posibles a expensas de grandes y nutridos políperos, los cuales exigen una temperatura media que no sea inferior a 20 grados, un agua límpida, con la salinidad normal y agitada de continuo, y una base rocosa donde pueda sentar sus reales la colonia viviente. Así se explica que sólo se encuentren en la zona tropical. Dichos criaderos se desarrollan a una profundidad máxima de 90 metros, aunque la mayor exuberancia corresponde a las regiones superficiales hasta los 40 metros de fondo.

Las formaciones madreporicas pueden adoptar tres aspectos distintos. 1) Los *arrecifes costeros* son masas coralinas que se hallan adheridas fuertemente a las tierras del litoral constituyendo una amplia plataforma que festonea la costa. 2) Los *arrecifes barrera* se presentan como una extensa banda que se desenvuelve paralela a la costa a algunos centenares o miles de metros de distancia de ella. La Barrera de Caledonia tiene 830 kilómetros de longitud y 1.600 de circuito; y la Gran Barrera de Australia mide 2.400 kilómetros de largo por 150 de ancho. 3) Los *atolones* tienen la forma de una isla, generalmente circular, con una gran laguna de poca profundidad en el centro de la misma, y aparecen emplazados en regiones alejadas de la costa. Son los edificios madreporicos más curiosos y más interesantes, por cuanto la mayor parte de las islas de Oceanía son atolones de superficie variable, alcanzando algunos hasta 240 kilómetros de perímetro, como el de Truk, en las islas Carolinas.

*Origen de las formaciones coralinas.*—Las características que presentan las islas madreporicas se ha pretendido razonarlas de varias maneras.

---

(1) PRIVAT-DESCHANEL, *Oceania*.

Para Darwin, arrecifes costeros, arrecifes barreras y atolones no son más que fases distintas de un mismo proceso evolutivo, que puede estudiarse muy claramente en las islas. En sus inicios, se formaría el arrecife costero, apoyado sobre los bajos fondos de la plataforma litoral, el cual circundaría las costas insulares; después, la isla se hundiría lentamente, y en un segundo estadio quedaría en arrecife barrera, tal vez semisumergido, pero que pronto culminarían los corales con su trabajo incesante, formando un anillo emergido separado de tierra por la banda lagunar que rodea la isla en esta clase de formaciones. Finalmente, el resto insular acabaría desapareciendo bajo las aguas y sólo quedaría el arrecife coralino anular rodeando una laguna central. Según Darwin, pues, la causa de esa evolución radica en el hundimiento; cada atolón sería el testimonio de una isla sumergida y así se explicaría el hecho de formaciones madreporicas a grandes profundidades. En apoyo de esta teoría vienen los numerosos términos de tránsito que en la mayoría de los mares aparecen entre los atolones y los arrecifes costeros (fig. 62).

Murray, entre otros autores, parte de un punto de vista opuesto y trata de explicar la presencia de arrecifes madreporicos a 300 metros de altura sobre el nivel del mar actual (p. ej., en las islas Salomón), es decir, en regiones de levantamiento. Por esta razón opina, en contra de Darwin, que los arrecifes coralinos se forman por un lento proceso de emersión; la base de apoyo se encontraría en los bancos submarinos formados por depósitos terrígenos, organógenos o volcánicos, que, en su movimiento ascensional, al llegar a profundidades inferiores a los 100 metros, permitirían el desarrollo de las formaciones madreporicas, que crecerían hasta alcanzar la superficie. A partir de este momento, su forma exterior depende ya nada más que de sus condiciones de fijación, y según estén más o menos lejos de la costa, darían lugar a los arrecifes costeros o a los arrecifes barreras, respectivamente. El caso más difícil de explicar es el de los atolones. La primera idea que se produce en el espíritu es que los corales se han desarrollado en los bordes de un cráter submarino (CHAMISO); pero esta idea es inadmisibile, por cuanto no ha podido ser comprobada en ningún caso. Para Murray, al aflorar aislado en el mar un saliente coralino, la misma acción

del oleaje, al favorecer el crecimiento de los corales situados en la parte periférica por la continua renovación del medio alimenticio, determinaría la forma del atolón. Passarge viene en ayuda de esta opinión explicando la forma de los atolones exclusivamente por el juego mecánico del oleaje, de la misma forma que en los desiertos un saliente rocoso o una planta determina la acumulación de la arena y la formación de los mé-

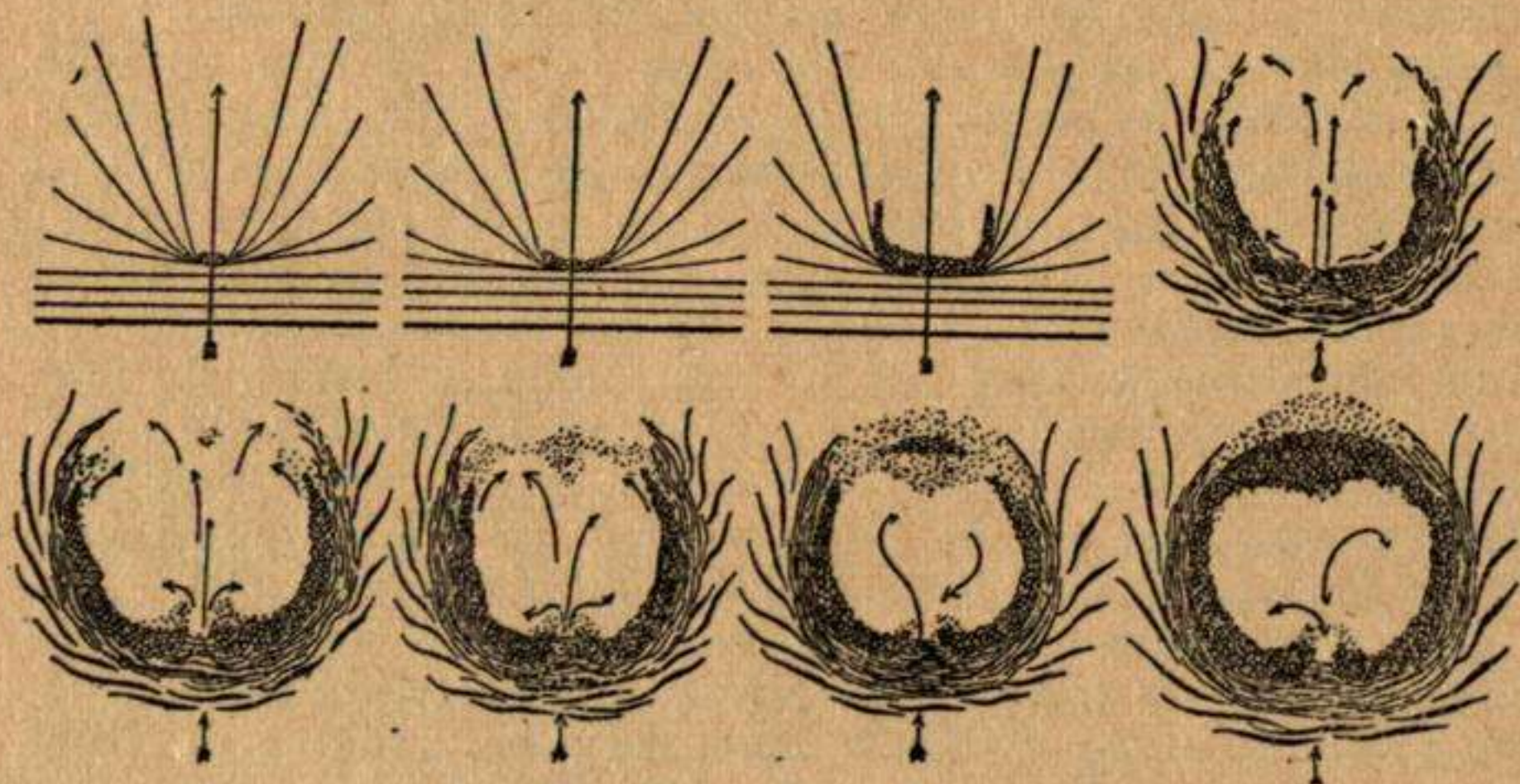


Fig. 61.—Formación de los atolones por acción mecánica del oleaje sobre un roquedo emergente (Passarge).

danos semilunares. La laguna central se forma en el lado opuesto a la dirección dominante del oleaje, igualmente que en el médano la depresión se sitúa en la parte opuesta a la dirección del viento dominante (fig. 61).

Daly, en su teoría glaciológica, explica la formación de los arrecifes madreporicos sin necesidad de recurrir a hipotéticos movimientos de elevación o descenso del suelo submarino, sino que, por el contrario, toma como punto inicial de su teoría la estabilidad del fondo oceánico. Mientras el suelo permanece fijo, es, por el contrario, el nivel de las aguas oceánicas el que sufre desplazamientos en sentido vertical; la causa de estas oscilaciones del nivel absoluto de los mares debe buscarse en el ritmo alternante de periodos glaciares, durante los cuales el hielo se acumula en los casquetes polares y en la cima de las montañas, y periodos interglaciares, en los



que tiene lugar la fusión de las grandes masas de hielo acumuladas anteriormente. Al disminuir el nivel de las aguas, el oleaje arrasaría los salientes rocosos convirtiendo las islas madreporicas en simples plataformas rasantes con la superficie del mar; después, durante el movimiento oceánico transgresivo, los corales podrían desarrollarse de nuevo sobre la plataforma arrasada, pero su crecimiento sería más intenso en los bordes por la renovación más favorecida del medio nutritivo; así se formarían los atolones. En favor de esta teoría abundan la pretendida constancia en la profundidad de las lagunas centrales y un principio de estratificación que se observa en algunos arrecifes, así como la existencia de las precitadas plataformas madreporicas que sirven de base a algunos arrecifes actuales (fig. 63).

Estas teorías, basadas en la estabilidad, hundimiento o levantamiento del fondo oceánico, parecen explicar algunos casos particulares, sin poder llegar a la exclusión de ninguna de ellas ni sin que puedan ser generalizadas; en realidad, el origen de las blancas islas del Pacífico continúa siendo tan misterioso como sus mismos habitantes.

*Formaciones petrolíferas.*—Otro aspecto muy interesante de la labor constructiva de los seres vivientes corresponde a la formación de los aceites minerales, cuyas capas se interponen entre los estratos de la corteza terrestre.

Estos yacimientos de materias combustibles, unas veces se presentan en masas sólidas irregularmente sedi-

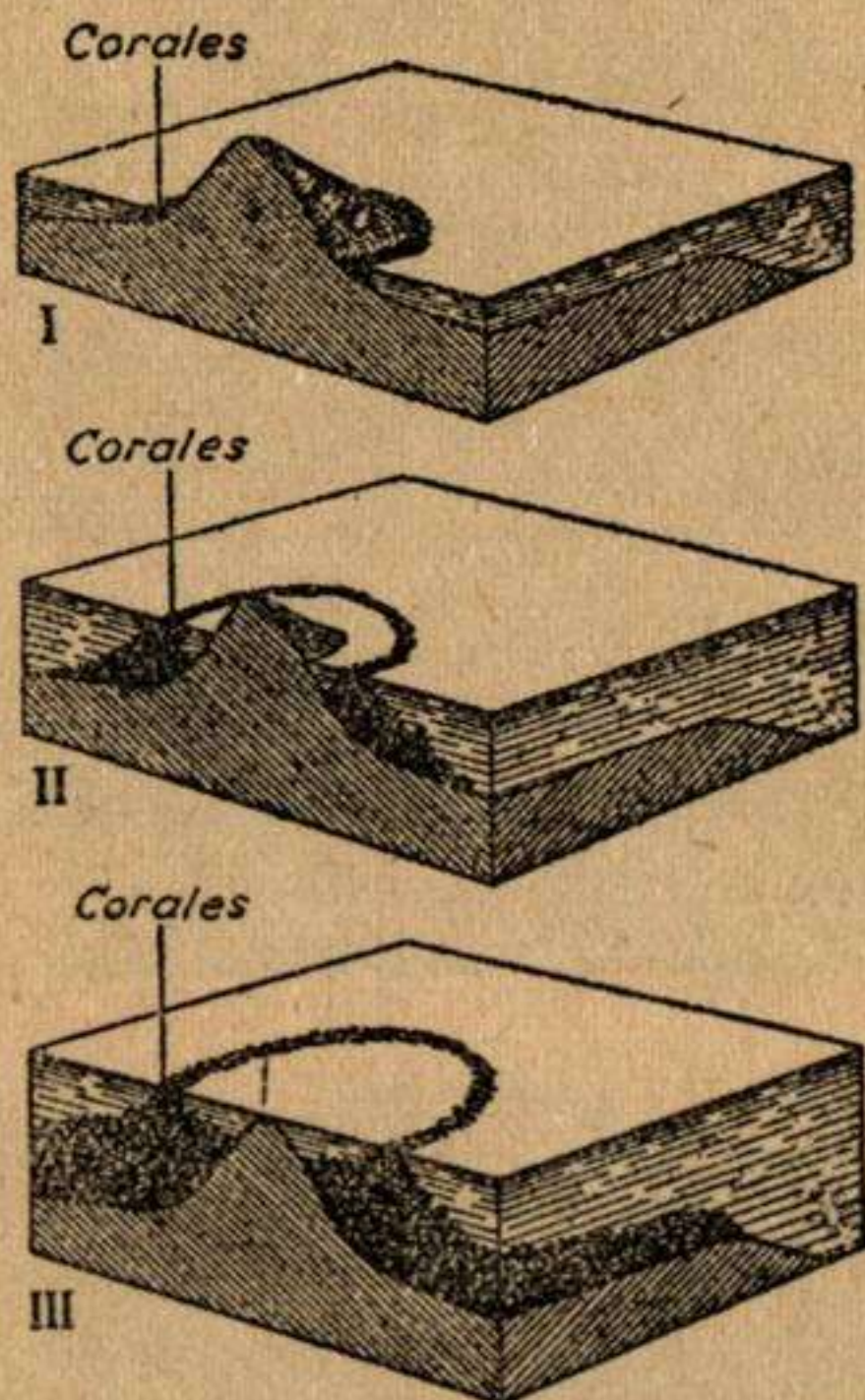


Fig. 62.—Formación de los arrecifes coralinos según la teoría de Davis. I, arrecife costero. II, arrecife barrera. III, atolón o atolón.

mentadas en un contenido arcilloso o calizo y constituyen los *asfaltos* o *betunes*; otras veces se ofrecen en estado líquido, determinando los *petróleos* estrictos, tanto ligeros como pesados; y, finalmente, afluyen en acumulaciones gaseosas, que se inflaman en la superficie, como en la zona petrolífera de Bakú, en el mar Caspio, donde continúan ardiendo desde tiempos muy remotos.

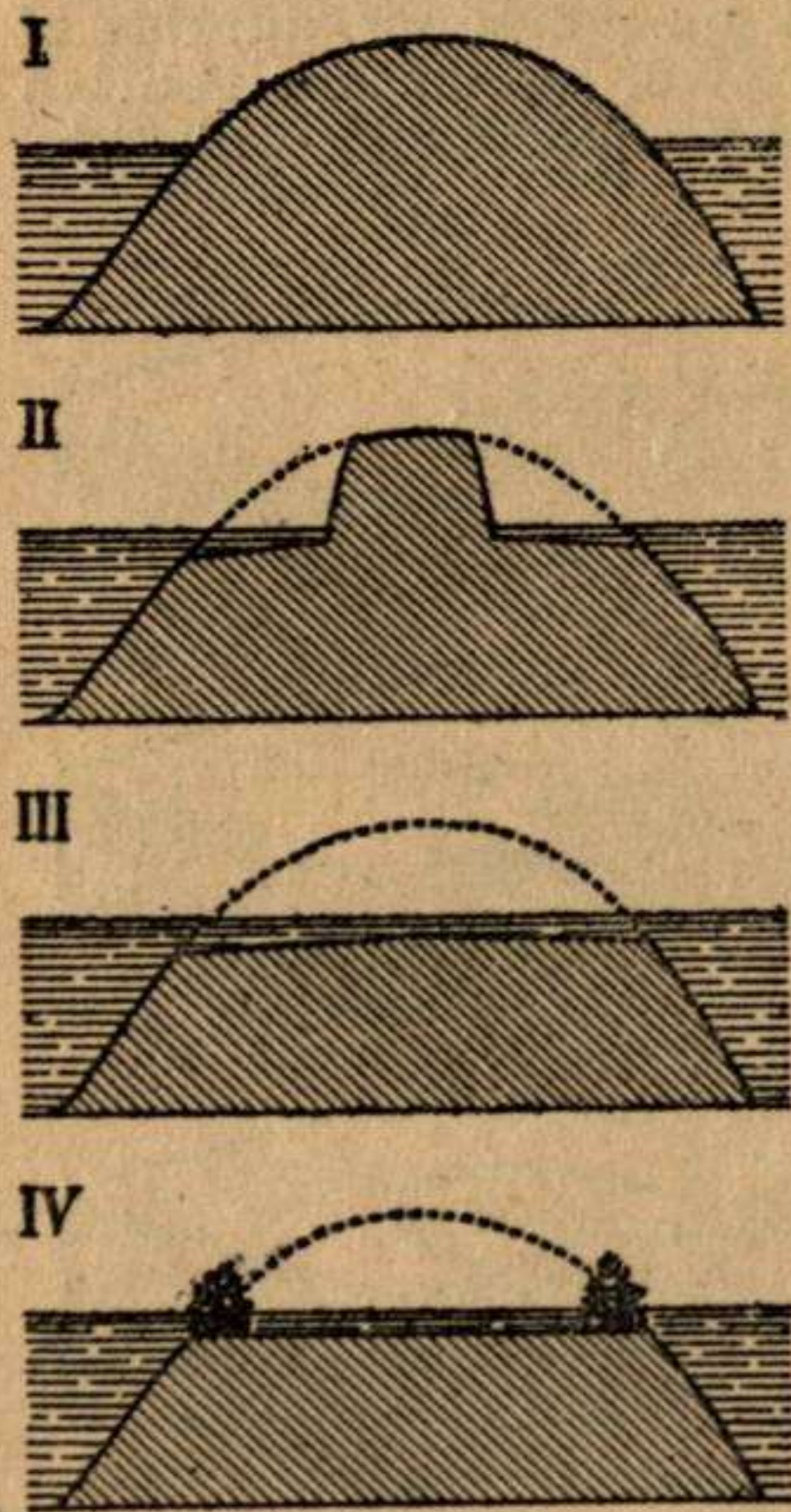


Fig. 63.—Formación de un atolón según la teoría de Daly (tomado de Allix).

I. Emersión del fondo submarino por descenso del nivel del mar (período glaciario).

II. Arrasamiento de la región emergida.

III. Plataforma de abrasión y nueva invasión marina (período interglaciario).

IV. Desarrollo de los corales en los bordes de la plataforma de abrasión.

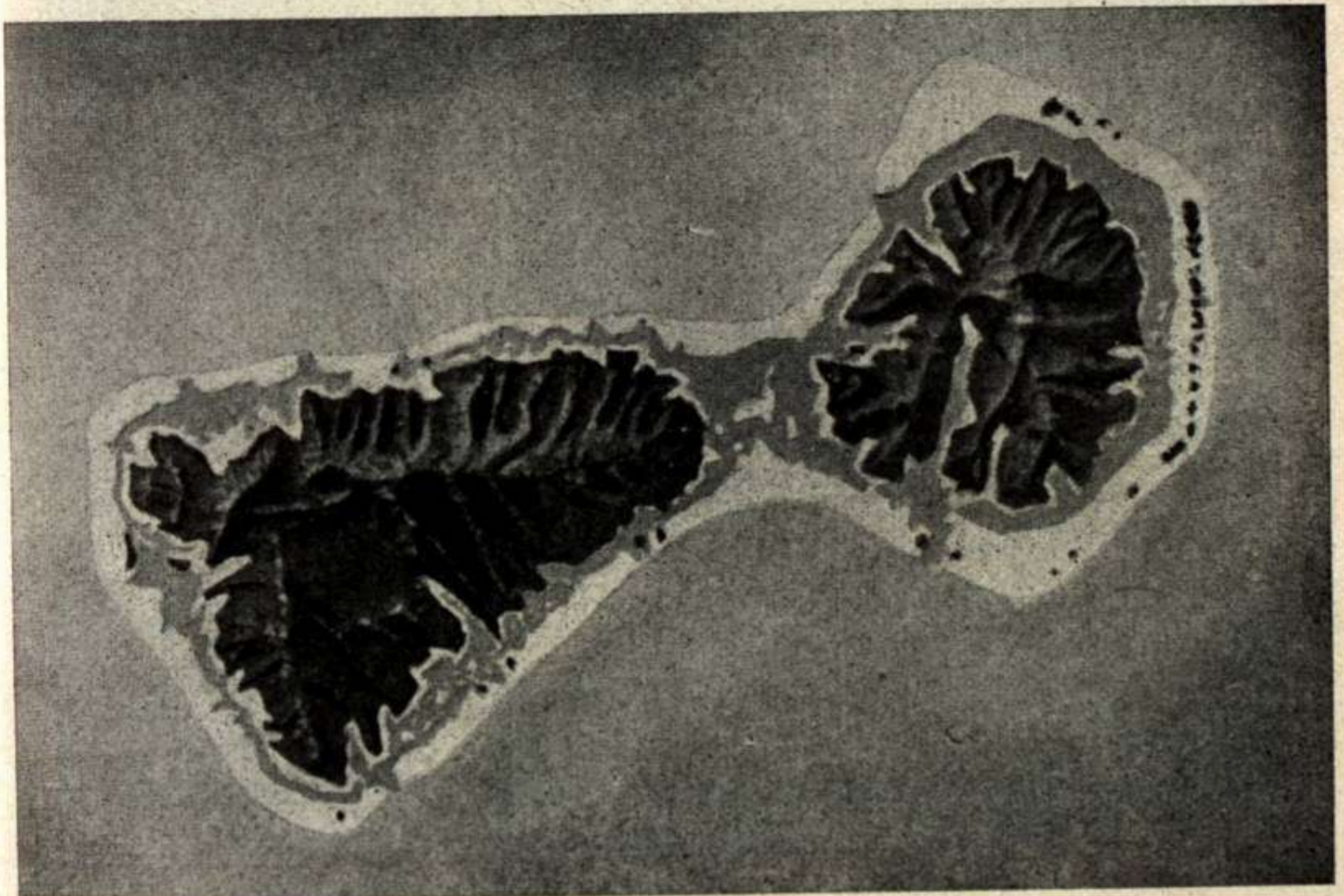
En un principio, estas formaciones se atribuyeron al influjo de la actividad volcánica; pero se ha comprobado su independencia de los terrenos de esta naturaleza; son esporádicas en los sedimentos primarios y secundarios, y afloran en proporciones exorbitantes en los terciarios. Esta falta de aceites minerales en la antigüedad geológica, y su poca densidad, inclinaron el ánimo a favor de su origen orgánico; y por su inexistencia en los depósitos de hulla, así como por su cortejo obligado de aguas saladas, se ha llegado a la conclusión de una procedencia animal.

Para la posibilidad de esta clase de yacimientos se requiere una enorme cantidad de restos animales, que pueden darse cuando grandes bandadas de estos seres vivientes encuentran una súbita muerte y quedan acumulados

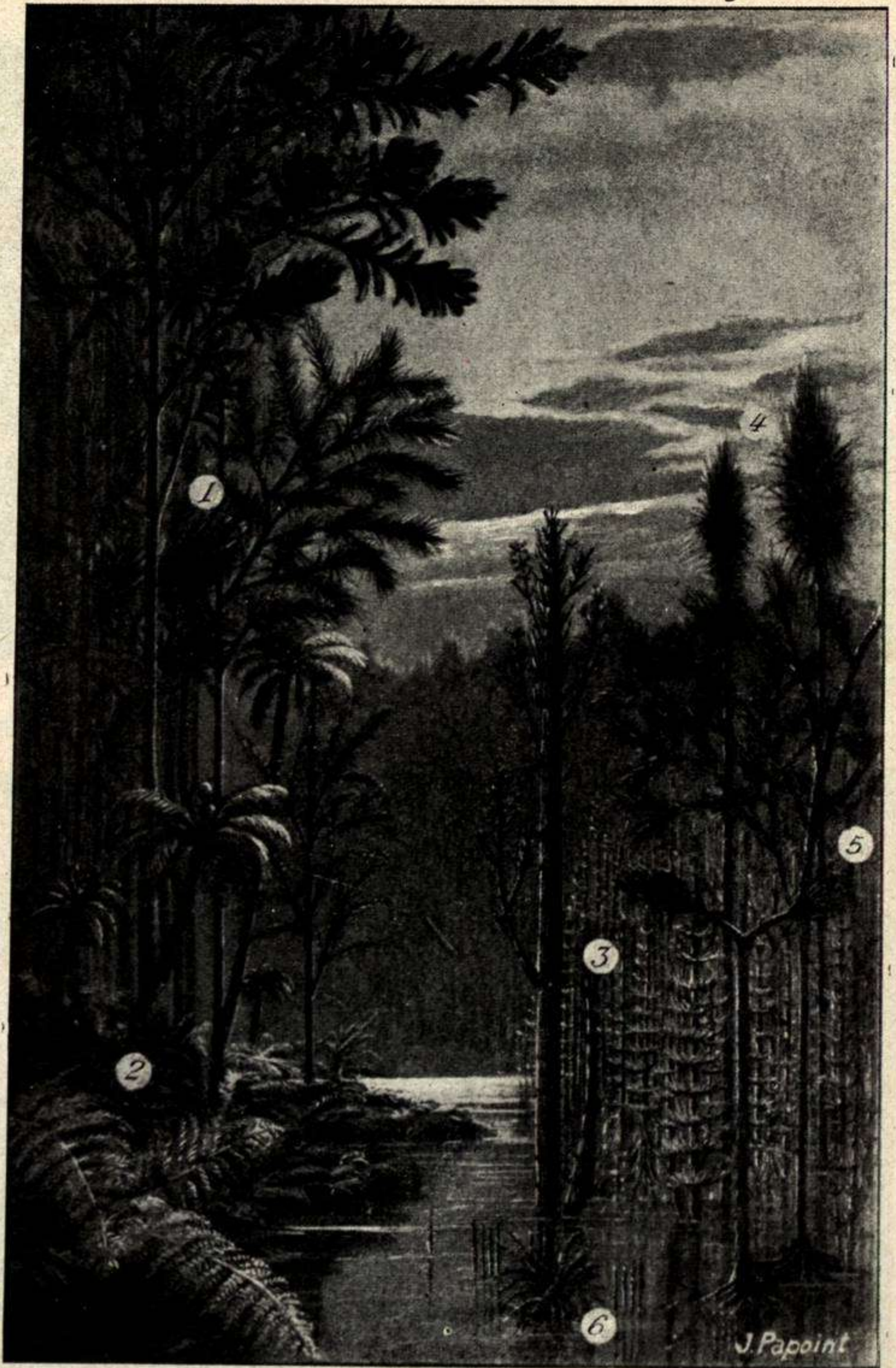
FORMACIONES CORALINAS



FIG. 1. — Atoll de la isla Clipperton, en el Pacífico.  
(Foto. L'Illustration)



Instituto S. Fig. 2. — Arrecife-barrera de Raiatea y Tahaa, en el Pacífico.  
(Foto. The National Geographic Magazine)



Reconstrucción de un bosque del periodo carbonífero

1, Cordaites.

2, Helechos arborescentes.

3, Calamites.

5, Lepidodendrons.

4, Sigilarias.

6, Sphenophyllums.

(De Boule)

en masa informe de cadáveres. Un cambio de temperatura o de salinidad puede producir el fenómeno; el primero es dable en la zona de las corrientes marítimas cálidas y frías, y el segundo en las bahías o albuferas que reciben intensas aportaciones de sales. En ambos casos, el paso de los animales marinos de una a otra zona determina la rápida muerte de la mayoría. En el banco de Terranova y en el de las Agujas se patentizan actualmente ejemplos de esta especie, por el contacto de corrientes cálidas y frías.

También ciertos fondos lacustres o pantanosos ofrecen depósitos de combustibles bituminosos. Son de cuenca cerrada, y en ellos se acumulan los restos cadauéricos de algas y de algunas especies animales junto con sus excrementos, cuyo cieno origina las indicadas formaciones. En el lago Asphaltites o Mar Muerto se encuentra flotante un betún o pez natural; en el lago de Brea, en la isla de la Trinidad (Antillas) y en Libros (Teruel), aparece una notable riqueza de asfalto.

Además, es indispensable que la descomposición de los referidos restos tenga lugar en determinadas circunstancias, para lo cual deben quedar sumergidos totalmente en el cieno putrefacto. Una descomposición al aire libre o en suelo arenoso consumiría por entero las substancias orgánicas, pero no lograría transformarlas en materia combustible. Engler obtuvo un petróleo mediante la destilación del hígado de bacalao a temperaturas elevadas, lo que hace presumir, en los aceites minerales, un proceso derivativo de las substancias grasas.

## CAPÍTULO XIV

### GEOLOGÍA HISTÓRICA

#### Principios fundamentales

El pasado de nuestro planeta desde el momento en que, por poseer una costra cortical bien desarrollada, empiezan a depositarse en ella las formaciones sedimentarias, pasa por una serie de profundas transformaciones provocadas por el incansable dinamismo de los agentes geológicos internos y externos. La finalidad primordial de la Geología Histórica es reconstruir punto por punto esas vicisitudes, cuyas huellas debemos encontrar en la naturaleza y disposición de los sedimentos estratificados que forman la corteza.

Tres son los objetivos principales de la Geología Histórica. Primero y principal, establecer la sucesión cronológica de los sedimentos, pues únicamente de esta forma es posible reconstruir a través del tiempo la ordenación de los fenómenos y hechos que va descubriendo y anotando el geólogo. La disciplina que tiene este objeto se denomina *Estratigrafía*, por basarse en el conocimiento de las formaciones sedimentarias o estratos.

En segundo término interesa conocer las características geográficas de la Tierra en cada uno de los períodos que distingue la Geología Histórica, es decir, el clima, el paisaje, la distribución de los continentes y de los océanos. La *Paleogeografía* cumple con tal finalidad.

El procedimiento para establecer las correlaciones cronológicas que exige la Estratigrafía, se basa principalmente en la comparación de los fósiles o restos de seres vivientes propios de cada época, que los estratos contienen y en cuyo estudio se ocupa la *Paleontología*.

El primer problema fundamental que se presenta, pues, al geólogo es clasificar y ordenar las series de

capas según su edad relativa, ya que sobre el terreno no aparecen etiquetadas con la claridad esquematizada con que las representa un mapa geológico.

Teóricamente, la cuestión no ofrece grandes dificultades. Basta tener en cuenta el llamado *principio de la superposición de los estratos*, que se deduce de su modo de formación en los fondos oceánicos. La capa más antigua será la primeramente sedimentaria, y, por lo tanto, estará colocada debajo de las que, por ser más modernas, se han depositado encima. Es evidente que si, en algún punto del Globo, la sucesión de capas superpuestas no hubiese sufrido ninguna interrupción desde los primeros momentos de la historia sedimentaria de la Tierra, encontraríamos resuelto el problema en un solo corte del terreno, todo lo profundo que fuera necesario. Establecido el orden de aparición de los distintos niveles de capas, bastaría recurrir a esta escala cronológica, que serviría de tipo y de término de referencia, cuando encontrásemos un terreno acerca de cuya edad hubiese dudas.

Pero la práctica enseña que en ningún punto de la Tierra se encuentran así reunidas y numeradas las páginas de su enigmática historia. Los plegamientos han alterado de tal suerte la estratificación primitiva, que a veces encontramos sedimentos modernos debajo de otros más antiguos (*corrimiento*) y aun es frecuente que todo un paquete de estratos haya invertido de tal forma el orden natural de superposición, que la antigüedad disminuya hacia la base de la serie (*pliegues acostados*). Por otra parte, los períodos de emersión se caracterizan a veces por la ausencia casi absoluta de sedimentos, que en cambio aparecen en parajes más lejanos temporalmente hundidos; y hasta no es raro el caso en que la erosión actual y la de otros períodos geológicos haya hecho desaparecer en algunos bloques continentales emergidos series estratigráficas enteras; siempre que por una u otra causa faltan algunos de los términos de una serie sedimentaria se dice que existe una *laguna estratigráfica*, indicio infalible de la existencia de un movimiento epirogénico.

En las series estratigráficas aparecen también, muy frecuentemente, soluciones de continuidad que no son debidas a fractura de los estratos, sino a la disposición conocida con el nombre de *discordancia*. Ésta se pre-

senta siempre que vuelve a sumergirse una formación geológica después de una fase de plegamiento o de emergencia. En estas condiciones, las nuevas capas sedimentarias se depositarán horizontalmente sobre un zócalo ya plegado o sobre un viejo bloque continental hundido; en ambos casos, entre la serie horizontal, nueva, y las capas antiguas habrá una diferencia de buzamiento, o, lo que es lo mismo, se dice que son discordantes. De esta manera es posible fijar la edad de una fase de plegamiento, pues éste debe ser posterior a la sedimentación de las capas plegadas y anterior al depósito de las que descansan discordantes encima de las primeras (fig. 64).

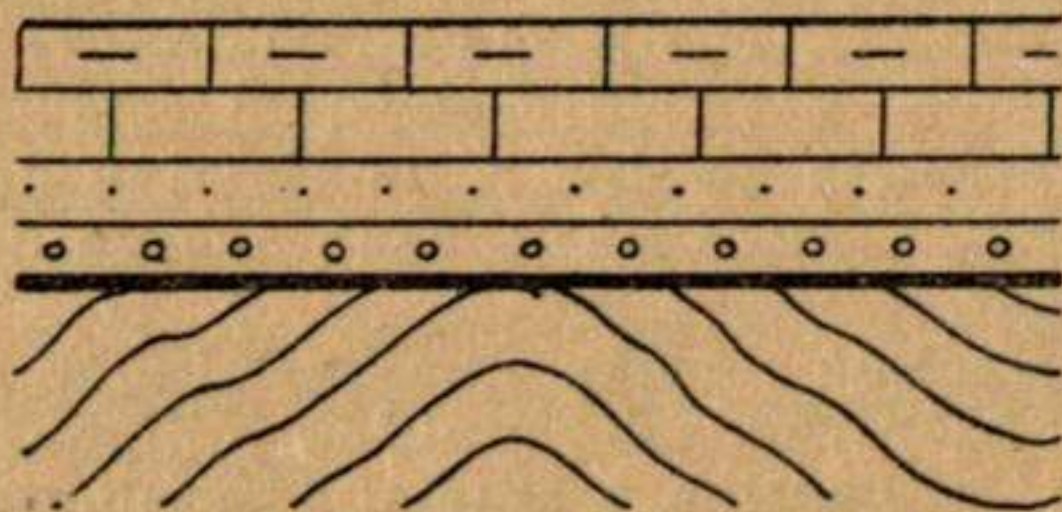


Fig. 64.—Discordancia entre dos series sedimentarias. La inferior, plegada; la superior es transgresiva y principia por conglomerados de base y areniscas.

Sea debido a la erosión o a los movimientos epirogénicos, es inútil, pues, buscar una tabla cronológica ya compuesta y ordenada según el orden de aparición de los estratos. La historia de la Tierra se encuentra escrita en una serie de páginas sin numerar y esparcidas por todo el Globo, que son las capas o estratos. La labor del geólogo consiste en ordenar estos fragmentos dispersos, para con ellos poder reconstruir la historia geológica de la Tierra.

### Valor documental de los fósiles

Si unos mismos seres hubiesen poblado las aguas y las tierras desde el momento en que se inició la vida hasta la actualidad, sería imposible resolver el pro-



blema de la sucesión cronológica de los estratos que tan confusamente aparecen dispersados, ya que las distintas clases de rocas lo mismo pudieron formarse en unos períodos que en otros; el carácter petrográfico de las formaciones no sirve, pues, más que en casos muy especiales, y siempre con carácter local restringido, para solucionar el problema.

Pero los seres vivientes sufren una evolución continua aunque lenta, como lentamente se va modificando la faz de la Tierra. Los animales y plantas que vivieron en un período de tiempo determinado, no son iguales a sus progenitores ni a sus descendientes, aunque las diferencias entre generaciones muy próximas sean casi imperceptibles. Por eso, siendo los períodos geológicos de larguísima duración, se comprende que cada uno de ellos podrá ser caracterizado por su fauna y flora propias.

Con esto el problema queda reducido a estos términos: los terrenos que encierran los mismos fósiles son sincrónicos.

Así queda muy adelantada la resolución del problema, pues no será difícil encontrar en determinadas regiones sedimentos de períodos consecutivos que se hayan depositado sin interrupción; con lo que podrá ya establecerse una sucesión cronológica entre dos o más series. Luego el mismo principio podrá ser aplicado en otras regiones donde aparezcan algunos de los términos conocidos en contacto con otros que se encuentran a faltar en aquellas regiones anteriormente estudiadas. Y así sucesivamente, relacionando unos depósitos con otros, será posible seriar por el orden de aparición las distintas capas sedimentarias. Los fósiles vienen a ser, pues, en la imagen que hemos empleado, el texto de las hojas dispersas de la historia de la Tierra, gracias al cual es posible enlazar unas páginas con otras e hilvanar científicamente el pasado.

Sin embargo, los fósiles no resuelven tan llanamente el problema planteado. En primer lugar, hay seres que apenas han variado desde los comienzos de los tiempos geológicos; otros son de evolución tan lenta que las mismas formas alcanzan períodos distintos. Sólo unos pocos son de tan rápida evolución que cada eslabón de la cadena permite caracterizar un período determinado. Además, tampoco esto es suficiente. Para que estos fósiles

les tengan valor como documento cronológico se necesita que su área de dispersión alcance a casi todo el Globo, pues de otra forma no serviría más que para identificar los sedimentos de una región muy limitada de la Tierra.

Los fósiles que reúnen esas dos condiciones óptimas: evolución rápida y gran dispersión, reciben el calificativo de *fósiles característicos* y son los únicos que utiliza el geólogo para determinar la edad de las capas.

### Concepto del período geológico

Dos razones que se complementan han servido para dividir la historia de la Tierra en fases o períodos que no tienen nada de arbitrarios.

En primer lugar se ha observado que la evolución de las especies fósiles no sigue el mismo ritmo a través de los tiempos, sino que, en determinados momentos, hay un cambio brusco que se señala por la aparición de nuevos seres y la extinción de grupos numerosos. Cuvier ya había observado este hecho, y para explicarlo ideó su teoría de los cataclismos, suponiendo que la Tierra había pasado de vez en cuando por una serie de trastornos catastróficos durante los cuales habrían desaparecido la mayor parte de las especies y aparecido después otras nuevas.

Este hecho paleontológico viene complementado por otro estratigráfico. A cada transformación paleontológica corresponde por lo general un ciclo geológico; la aparición de nuevas formas coincide con los cambios sedimentarios inherentes a la repetición del ciclo de los fenómenos geológicos. Basándose en estos dos fenómenos, se ha ideado una serie de divisiones y subdivisiones estratigráficas y cronológicas, cuya nomenclatura conviene conocer.

Las grandes fases de la historia terrestre se denominan *Eras* (Era Primaria, Secundaria, etc.), las cuales comprenden las formaciones sedimentarias que constituyen un *Grupo*. En cada Era se distinguen diversos *Períodos* y en cada Grupo hay varios *Sistemas*. Los Períodos se subdividen a su vez en *Épocas* y *Edades*, y los Sistemas en *Series* y *Pisos*, respectivamente. En éstos se distinguen todavía las *Hiladas* o grupos de capas iguales.

La correspondencia entre divisiones estratigráficas y cronológicas viene expresada en el siguiente cuadro:

<i>Divisiones cronológicas</i>	<i>Divisiones estratigráficas</i>
<i>Era</i> (Primaria, Secundaria, etc.) . . . . .	<i>Grupo</i> (Primario, Secundario)
<i>Período</i> (Carbonífero, Triásico, etc.) . . . . .	<i>Sistema</i> (Carbonífero, etc.)
<i>Época</i> (Liásica, etc.) . . . . .	<i>Serie</i> (Liásica, etc.)
<i>Edad</i> . . . . .	<i>Piso</i> (Cenomanense, etc.)
	<i>Subpisos.</i>
	<i>Hiladas.</i>
	<i>Capas o Estratos.</i>

*Métodos y problemas de la Paleogeografía.*—La Paleogeografía nace al situar en el mapa los datos aportados por las otras ciencias geológicas históricas; la Estratigrafía, acerca de la edad de las formaciones sedimentarias; la Paleontología, respecto a los seres y géneros de vida desarrollados en las pasadas épocas geológicas.

Al señalar la extensión ocupada por un terreno determinado de origen marino, por ejemplo, en realidad lo que hacemos es señalar las áreas sumergidas en aquella época y el contorno probable que los continentes tendrían entonces. Asimismo la Paleogeografía recurre a la naturaleza de los sedimentos continentales (variables con el clima, véase Capítulo XIII) para reconocer el emplazamiento de las zonas climáticas antiguas (*Paleoclimatología*). Estudiando la dispersión geográfica de las distintas especies vegetales y animales se establecen las provincias biogeográficas del pasado (*Paleobiogeografía*), en relación con el clima, distribución de continentes y mares, etc. De esta forma surge una reproducción fidedigna del cuadro geográfico de los diversos periodos geológicos.

### Edad de la Tierra

La fauna y la flora fósiles son los elementos que sirven para determinar la edad relativa de las formaciones sedimentarias, no solamente en cuanto se refiere al orden de sucesión de los estratos, sino incluso acerca de la duración relativa de cada uno de los distintos periodos geológicos. En efecto, el estudio comparativo del desarrollo de los diversos grupos paleontológicos a través de la historia de la Tierra, demuestra que los orga-

nismos superiores, ya sean plantas o animales, evolucionan mucho más rápidamente que los inferiores, o, lo que es lo mismo, reaccionan con mayor viveza ante los cambios del medio ambiente. Ahora bien; como esos organismos de complicada organización son los últimos en aparecer, resulta que los elementos que se utilizan como término de comparación, como jalones que señalan la velocidad en la ruta seguida a través del tiempo, y que indican con su transformación orgánica el comienzo de un nuevo período y, por lo tanto, de unas nuevas condiciones del ambiente, aparecen más juntos y apretados en las últimas etapas. Esas piedras miliarias acreditan que el Primario ha sido de mayor duración que el Secundario, y éste, a su vez, mayor que el Terciario. Asimismo, dentro de una misma Era, los distintos períodos son cada vez más cortos: el Carbonífero más que el Devónico, y éste más que el Silúrico.

Pero todos esos datos no proporcionan la menor indicación acerca de la edad absoluta de la Tierra, expresada en unidades de tiempo, años y siglos. Es natural que ese problema haya preocupado a los geólogos, los cuales han seguido diversos caminos para resolverlo. Unos han tomado como término de comparación el tiempo necesario para que se produzca un proceso erosivo de proporciones definidas, conociendo anticipadamente el valor anual atribuible a la erosión en determinadas circunstancias. Otros, los más, han tomado los procesos sedimentarios, avances de deltas, depósito de capas sedimentarias o de yacimientos minerales. Otros, finalmente, han intentado determinar la edad absoluta de la Tierra utilizando la salinidad del mar y suponiendo que las sales que éste contiene proceden del continente y han sido trasladadas por disolución. Todos estos cálculos, dependientes de múltiples variables, conducen a resultados bastante diferentes.

Hoy, basándose en ciertas propiedades de los minerales radioactivos, ha sido posible llegar a conclusiones mucho más aproximadas y sujetas a mayor rigorismo científico. Los elementos radioactivos como el Torio y el Urano sufren un lento proceso de desintegración que conduce a la formación del gas helio y de un isótopo del plomo, es decir, un plomo de análoga composición química pero de distinta estructura atómica. Siendo fácil averiguar el tiempo necesario para que un

mineral radioactivo se transforme en helio y plomo, resulta posible investigar la edad de un mineral en proceso de transformación, y, por tanto, de los estratos que lo contienen, con sólo tener en cuenta la proporción entre el plomo y el mineral no desintegrado todavía.

Por este método se ha llegado a resultados altamente satisfactorios, siendo aceptables las siguientes cifras:

Era Arcaica ... ..	de 800 a 900 millones de años			
Era Primaria ...	de 360 a 540	»	»	»
Era Secundaria .	de 135 a 180	»	»	»
Era Terciaria ...	de 55 a 65	»	»	»
Era Cuaternaria .	más de 1 millón de años.			

Por lo tanto, la vida cuenta sobre la Tierra alrededor de unos 1.500 millones de años de existencia.

## CAPÍTULO XV

### ERA ARCAICA O AGNOSTOZOICA

Los primeros tiempos de la Tierra son tan nebulosos como los de la historia de la Humanidad. Faltan, en efecto, casi totalmente, los fósiles, que son los documentos que utiliza el geólogo para establecer la sucesión cronológica de los terrenos; por lo que solamente por conjeturas, por sus relaciones con sedimentos más modernos de edad conocida, es posible colegir cuáles son los materiales que se formaron en los albores de la historia geológica de nuestro planeta.

Siguiendo este criterio, se creía antes que las rocas metamórficas que aparecen ordinariamente por debajo de los terrenos de la Era Primaria eran los sedimentos que se habían depositado primeramente en la superficie terrestre. Corroboraba esta opinión el hecho bien conocido de que las formaciones metamórficas descansan siempre sobre el granito, el cual, al modo de ver de los geólogos de aquellos tiempos, era la primitiva corteza de consolidación de la Tierra, por cuya razón se llamaron *terrenos primitivos*.

Hoy esta opinión es absolutamente insostenible, pues son suficientemente conocidos los efectos del dinamometamorfismo; las rocas que forman el llamado *estrato cristalino* de los autores antiguos pudieron haberse formado a expensas de sedimentos mucho más modernos y a causa de las enormes presiones y elevada temperatura a que se hallaron éstos sometidos. Su naturaleza petrográfica nada acredita, pues, acerca de la edad que tengan los estratos, ya que depende únicamente de la mayor o menor proximidad a las zonas internas del geosinclinal en que se efectuó la metamorfización. Por otra parte, sabemos que el granito no representa la primitiva corteza de la Tierra, sino que incluso suele ser el último término del proceso metamórfico que tiene

lugar en el fondo de los geosinclinales. Además, la aparición de estas rocas nos viene determinada precisamente por la edad de los sedimentos que, por estar en contacto con ella el magma intrusivo, se han metamorfoseado; así, por ejemplo, en el Pirineo y en las montañas catalanas, el granito ha metamorfoseado casi todos los sedimentos pertenecientes a la Era Primaria. de lo que deducimos que aparecería al finalizar dicho período; en cambio, en Portugal (Lisboa), se conocen granitos mucho más modernos que han metamorfoseado sedimentos pertenecientes a la Era Secundaria.

De esas consideraciones se deduce, pues, que muchas de las formaciones que en los mapas geológicos aparecerían como arcaicas pueden ser de edad posterior. Únicamente allí donde por debajo de los sedimentos fósilíferos con que comienza la Era Primaria aparecen formaciones sedimentarias bien desarrolladas es lícito hablar de terrenos pertenecientes a la llamada *Era Arcaica* o *Agnostozoica*. Y también deben incluirse en esta Era las rocas metamórficas y granitoideas que aparecen por debajo de las formaciones cámbricas con que empieza la Era Primaria sin haberlas metamorfoseado, lo cual demuestra que son anteriores a la sedimentación de dichos estratos.

La Era Arcaica comprende los sistemas *Arcaico* y *Algonquino*.

## PERÍODOS DE LA ERA ARCAICA

### Sistema Arcaico

Este sistema comprende las rocas cristalinas, granitos, neis, micacitas, etc. más antiguos. Pero únicamente puede determinarse con exactitud cuando dichas rocas aparecen en contacto con estratos algonquinos discordantes. En Norteamérica, además, debajo de éstos aparecen conglomerados, cuarcitas, etc., que presumen unas primeras rugosidades que denudaron los agentes erosivos en forma análoga a la de nuestros días. La presencia de rocas eruptivas, pórfidos, etc., habla de una actividad volcánica exteriorizada en fenómenos y productos de la misma naturaleza que los actuales.

*Paleontología.* — Hasta el presente no se tiene noticia de resto fósil alguno que permita asegurar la eclosión de la vida en este período. No obstante, las pocas rocas carbonosas del Arcaico, son atisbos de vegetales cuyas huellas desaparecieron por efecto del metamorfismo, y las escasas formaciones calizas interpuestas entre el neis y las pizarras hacen presumir la existencia de animales productores de sus elementos constitutivos.

### Sistema Algonquino

En este período se incluyen los niveles más elevados de los terrenos agnostozoicos. Inferiormente quedan limitados por los arcaicos, y sus confines superiores se codean con los del cámbrico en frecuente discordancia.

Las rocas algonquinas ya tienen un carácter sedimentario más neto: cuarcitas, pudingas y esquistos arcillosos, cuyos elementos proceden del ataque erosivo que sufrirían los antiguos salientes al emerger a la superficie. Las calizas de estrecha relación con los seres vivientes son muy escasas; en cambio abundan las rocas efusivas en forma de coladas, diques, tobas volcánicas, etc.

Las fuerzas orogénicas no permanecieron adormecidas; en las regiones nórdicas se levantó majestuoso el primer grupo de montañas de nuestro planeta. Es el plegamiento *Huroniano*, que se inicia en los alrededores del lago Hurón (Estados Unidos), luego pasa por tierras del Canadá y corre hacia Escocia, Escandinavia y Finlandia, y, finalmente, alcanza el borde meridional de la meseta siberiana; las montañas y las costas del Norte de Inglaterra llevan todavía la dirección NE-SO impuesta por este plegamiento.

Aparecen frecuentes discordancias entre los estratos algonquinos (en Finlandia se ven cuatro), de cuyo hecho se deduce un régimen de continuos y prolongados movimientos epirogénicos, así como una actividad erosiva muy intensa; y a juzgar por la profusión de productos volcánicos, es de estimar un volcanismo fuertemente acentuado.

*Paleontología.* — Este período cuenta ya con fósiles auténticos, pero en número muy escaso y en pobre estado de conservación, por lo que ha sido imposible recons-



truir un cuadro de conjunto de sus especies biológicas características.

No hay duda alguna que vivirían ciertos vegetales en esta época, pues así lo comprueban las impresiones de un alga, la *Alikokania lausoni*, y las capas del mineral carbonoso llamado *Shungita*, que se formarían de una manera semejante a la hulla (En Finlandia el carbón algonquino tiene dos metros de espesor).

Entre los vestigios del mundo animal cabe citar pistas de anélidos (*Arenicolites*) y restos de espongiarios, moluscos de concha deprimida y en particular los del crustáceo *Beltina Dandi*. Pero el brusco desarrollo y la gran complejidad de la fauna cámbrica, hacen suponer en este período una vida más rica y floreciente de lo que demuestran los escasos fósiles recolectados; así se manifestaría en el Algonquino y aun en el Arcaico, pero la destrucción de la mayoría de los fósiles más antiguos por el metamorfismo nos veda conocer los primeros peldaños del ciclo evolutivo de la vida vegetal y animal.

### Paleogeografía

*Clima.* — Poco se sabe del clima agnostozoico. No obstante, en los terrenos huronianos de Ontario (Canadá), abundan las piedras con estrías, restos morrénicos de una glaciación que se extendería por las primeras montañas. Este hecho, junto con la falta de calizas, nos dice que en América del Norte, durante el Algonquino, reinaría un ambiente más crudo que el de hoy.

*Tierras y mares.* — ¿Cuál sería el cuadro geográfico del mundo durante el agnostozoico?

Imaginémonos por un momento la amplia y espaciosa superficie de nuestro planeta cubierta por las aguas del primitivo mar, la *Panthalasa*. Luego, los primeros espasmos geotectónicos sacarían a flote unos manchones de tierra firme, raíz de los futuros continentes. Poco a poco, en las regiones nórdicas, se contornean dos grupos: uno con buena parte de Siberia y de China; otro, más extenso, con América del Norte, Groenlandia, Escandinavia y Finlandia. En el hemisferio Sur, con perfiles imprecisos y poco conocidos, seguramente se dibujaría el tercero, con tierras de América del Sur, África, Madagascar, India, Australia, estrechamente unidas en franja prolongada.

Tal sería el panorama del Arcaico, período de calma y quietud. En las aguas tranquilas del océano se iniciaría la vida en formas rudimentarias y simplicísimas; en su fondo se acumularían los materiales desnudos de la tierra firme.

Con el Algonquino, el planeta entra en una fase asaz movida e inquietante. Las fuerzas erosivas, continuando su labor demoledora, acrecen los depósitos derrubiados, que por su peso se hunden lentamente; el mar avanza y retrocede en amplio e indefinido vaivén; se intensifica la actividad interna y surgen potentes las primeras cordilleras rozando las áreas boreales; mares de hielo circulan por las cumbres; bocas de fuego vomitan la exuberancia del magma recluso en la endosfera; corrientes fluviales impetuosas festonean con sus derrubios los bordes meridionales de las tierras nórdicas; la vida animal se desenvuelve con lozanía en el océano, colorean en su fondo las primeras algas; con seguridad algunas manchas de verdor irrumpen en los litorales, y los núcleos generadores de los continentes redondean su figura.

Las fuerzas todas, dinámicas y biológicas, se remozan y vigorizan para emprender el arduo trabajo de las futuras modelaciones del relieve.

## CAPITULO XVI

### ERA PRIMARIA. EDAD DE LOS TRILOBITES

Las nebulosidades que envuelven los primeros estadios de la historia geológica de la Tierra se esfuman al comenzar la llamada *Era Primaria o Paleozoica*; la documentación paleontológica es ya abundante y suficiente para poder establecer una cronología veraz y de carácter universal que permita reconstruir las correlaciones existentes en la antigüedad geológica entre los continentes más alejados. Nos es perfectamente conocida la distribución de tierras y mares y se poseen restos fosilizados de la mayoría de los seres que los poblaron. Entramos en la verdadera fase histórica de la Geología; a las divagaciones y conjeturas de las nebulosidades prehistóricas del Arcaico se opone ahora un cuadro documental completo.

Pero para llegar a la configuración actual de la superficie y a la complejidad orgánica de los seres vivientes en nuestras tierras y mares, es preciso pasar antes por una serie de estados evolutivos de lento desarrollo. La faz de la Tierra, en la antigüedad paleozoica, en nada se parecía a la de hoy; pero en el transcurso de ella se levantaron los cimientos de la conformación futura; las montañas que emergieron fueron arrasadas después, algunas apenas destacan en el relieve terrestre actual, pero han sido los pilares resistentes contra los cuales se estrelló el impetuoso oleaje orogénico de los tiempos siguientes y que dieron lugar a la formación de las montañas que todavía se yerguen ingentes.

Los seres animales y vegetales de la Era Primaria son los ancestrales de los seres vivos actuales; pero de ordinario en nada se les parecen. Sin los términos de tránsito enterrados en las capas de la Tierra, sería casi imposible establecer un nexo de unión entre ellos. Muchos de los animales que señorearon por los océanos

paleozoicos, apenas han dejado rastro; grupos zoológicos enteros se han extinguido totalmente. Faltan casi todos los Vertebrados; ni las aves ni los mamíferos poblaron los medios vitales primarios. Es imposible entrever a través del restringido cuadro biológico de la época, ni tan sólo vagamente, el magno desarrollo de la vida futura. La biología del paleozoico, lo mismo que la configuración terrestre de esta época, se nos aparece tan remota como puedan serlo para el historiador los lejanos tiempos de la antigüedad.

Otros caracteres generales pueden atribuirse todavía al Paleozoico: la gran actividad volcánica y orogénica y su enorme duración; ésta se supone casi igual a la duración de las tres Eras geológicas restantes.

Estratigráficamente se comprenden en el Paleozoico las formaciones sedimentarias que descansan sobre las tierras agnostozoicas y cuyos pisos superiores confinan con los conglomerados y areniscas rojos que señalan el comienzo del Secundario. Se divide en cinco períodos: *Cámbrico*, *Silúrico*, *Devónico*, *Carbonífero* y *Pérmico* (estos dos últimos reunidos, según criterios, en uno solo llamado *Antracólitico*).

### Caracteres litológicos

En este grupo predominan las rocas de origen detrítico, conglomerados, areniscas, pero sobre todo se desarrollan extraordinariamente las formaciones pizarrosas; también se incluyen niveles calcáreos. Los estratos aparecen con frecuencia dislocados, especialmente en las zonas afectadas por los plegamientos paleozoicos, y menudean las intrusiones de rocas eruptivas.

Hacia la base de los terrenos primarios se encuentran principalmente pizarras a la vez elásticas y cristalinas, con abundantes minerales procedentes del metamorfismo (granates, etc.); a medida que las rocas alcanzan un nivel más alto, adquieren un carácter sedimentario más neto.

También se registran depósitos glaciares, visibles en China, Australia, India, etc.; seguramente se derivan de la gran altura que alcanzarían las montañas primarias en su juventud.

Con excepción de los glaciares, no se conocen sedimentaciones continentales en los tres períodos prime-

ros; pero al final del grupo adquieren importancia los yacimientos de agua dulce desarrollados en las montañas recién formadas, ya de índole fluvial con ricas capas de hulla, ya de carácter lagunar con restos de numerosos insectos, moluscos de agua dulce, batracios y reptiles que pululaban por los terrenos cenagosos. En este mismo período se desarrollan importantes formaciones lacustres y costeras de aguas salobres, donde se encuentran en mezcolanza restos animales de agua dulce y salada (En el Pérmico las formaciones salíferas de Stassfurth [Alemania] rebasan los 330 metros de espesor).

### Caracteres tectónicos

En esta época, las fuerzas orogénicas se muestran muy enérgicas y culminan en dos plegamientos de recia envergadura. El primero es a fines del Silúrico y comienzos del Devónico, originando la cadena *Caledoniana* (de Caledonia, antiguo nombre de Escocia) en las regiones septentrionales de Europa y de América del Norte. El segundo se produce hacia la mitad del Carbonífero con la cadena *Armoricana Varisca* o *Herciniana* (de Hercinia, nombre antiguo de Alemania), la cual afecta a la meseta Ibérica y a los países del Centro y Sur de Europa (Vosgos, Selva Negra, Ardenas, etcétera), Urales, Apalaches, tierras del Colorado y Sahara. Los Pirineos, Los Alpes y el Himalaya no son ajenos al trastorno geológico.

El volcanismo es de momento muy remiso; aumenta algo en el Silúrico y en el resto de la Era se manifiesta con extraordinaria violencia, sobre todo en las tierras recientemente levantadas y en los espacios anteriores y posteriores al plegamiento herciniano; la mayor parte de los granitos centroeuropeos aparecieron en esta época.

### Caracteres paleontológicos

Los seres que vivieron en el Paleozoico difieren enormemente de los actuales; sólo pueden citarse algunos casos que hayan resistido al embate de los siglos, tales como el molusco *Nautilus*, que aparece en el Silúrico,

y los protozoos Globigerinas, que figuran en el plancton de nuestros días.

*Paleobotánica.*—La flora desempeña un papel por demás interesante, pero sólo se desarrollan los grupos botánicos inferiores; no existen todavía plantas con flores. En los mares se manifiestan algunas algas de consistencia caliza, pero la preeminencia corresponde a los vegetales terrestres del grupo de las Criptógamas vasculares (Helechos, Colas de Caballo, etc.).

Las primeras plantas terrestres aparecen en el Devónico y adquieren su máxima exuberancia en el Carbonífero. Se encuentran helechos arborescentes parecidos a los actuales (*Pecopteris*, *Sphenopteris*, *Neuropteris*), otros tienen el tronco estriado longitudinalmente (*Sigillaria*) o recubierto de escamas dejadas por las hojas al caerse, como ocurre en el tronco de las palmeras (*Lepidodendron*). Existen también grandes equisetíneas (Colas de Caballo) de 4 a 5 metros. También figuran los primeros representantes de los árboles con semillas, pero sin flores (Gimnospermas), algunas parecidas a los pinos actuales.

Cada período carbonífero viene caracterizado por su correspondiente cuadro floral y faunístico. Primero aparecen las Equisetíneas, luego sobresalen los Helechos y surgen las primeras Coníferas. Al final del Carbonífero se dibujan ya dos provincias botánicas: una en Laurasia (Eurasia y América), con *Lepidodendron* y *Sigillaria*, y otra más fría, de *Glosopteris*, en el hemisferio Sur.

*Paleozoología.* — Los animales paleozoicos corresponden a los diversos tipos de los Invertebrados y en los pisos superiores se encuentran ya los primeros Vertebrados. Su compleja organización hace presumir una fauna precedente muy superior a la que se deduce de los escasos restos algonquinos. Aunque bastante homogénea, se distinguen algunas provincias zoológicas.

Los Protozoos debutan con los Foraminíferos, siendo numerosas las *Fusulinas*, que luego se extinguirán totalmente, y las *Globigerinas*, que aun persisten en nuestros mares.

No faltaron las Esponjas, así como tampoco los Pólipos o Celentéreos, entre los cuales destacan los *Graptolites* y algunos corales. Los *Graptolites* fueron medusas coloniales provistas de varias vesículas, flotantes y genera-

doras; de estas últimas partían sendos tallos con celdas alineadas a manera de sierras, cuya impresión se observa en los esquistos como dibujados al lápiz. Caracterizan el período Silúrico (figs. 65 y 66).

Los diversos órdenes de Equinodermos se produjeron con notable exuberancia; los Equínidos (erizos de mar) aparecen en el Silúrico y se singularizan por sus púas abultadas; otros son parecidos a las llamadas Comátulas y consisten en un tallo articulado provisto de gran número de tentáculos en la parte superior (figs. 67 y 68).

En las capas paleozoicas abundan extraordinariamente unos invertebrados de concha bivalva y asimétrica parecida a la de los moluscos lamelibranquios, pero que difieren de éstos porque la valva mayor forma un gancho, el cual presenta un orificio o foramen por donde emerge un pedúnculo carnoso que sirve para fijar el animal al

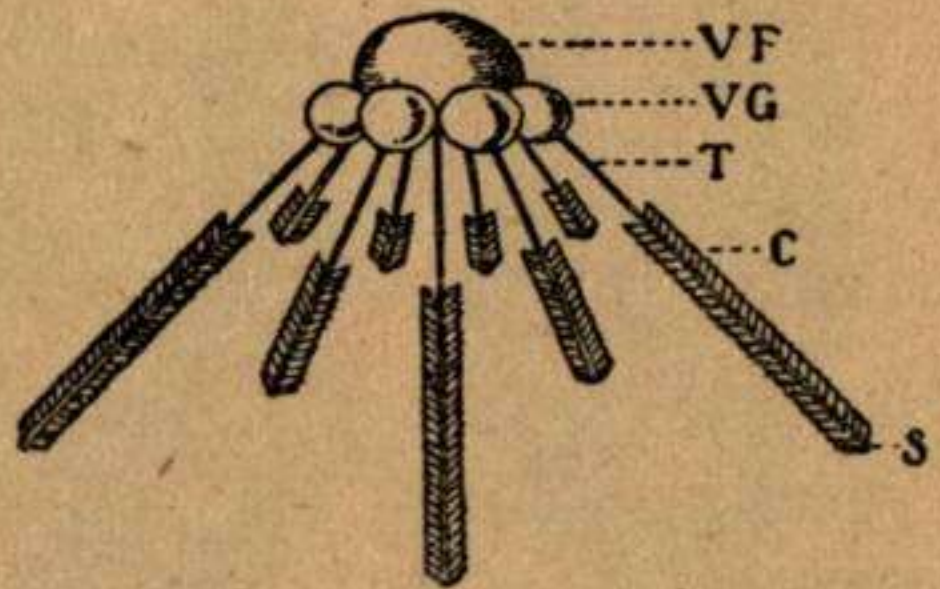


Fig. 65.—Graptolites restaurado (Colomb et Houlbert). VF, vesícula flotadora. VG, vesículas germinales. T, tallo. C, celdas. S, sícula terminal.

suelo (fig. 69). Por la forma de sus apéndices braquiales, que son muy desarrollados, reciben el nombre de Braquiópodos. El máximo desarrollo de este grupo ocurre en la Era Primaria, pues al finalizar el período quedan reducidos a un corto número de especies que todavía subsisten en la actualidad.

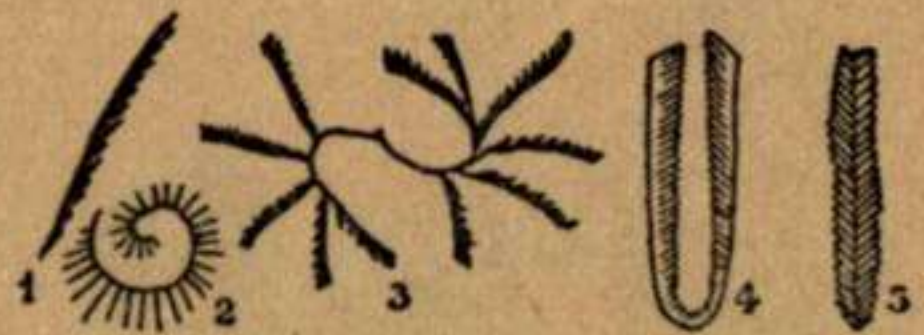


Fig. 66.—Diversas formas de Graptolites (Zittel). 1, *Monograptus*. 2, *Rastrites*. 3, *Leptograptus*. 4, *Dicrograptus*. 5, *Diplograptus*.

Los Artrópodos se manifiestan con Insectos y Crustáceos. Los primeros son numerosos desde el Silúrico; pero donde se manifiestan con pujanza es en los bosques del Carbonífero, con ejemplares de gran tamaño, como las Libélulas.

Entre los Crustáceos alcanzan enorme desarrollo los *Trilobites*, que desaparecen con el Primario. Su gran difusión permite llamar a la Era Primaria la edad de los Trilobites. Fueron animales marinos, de cuerpo

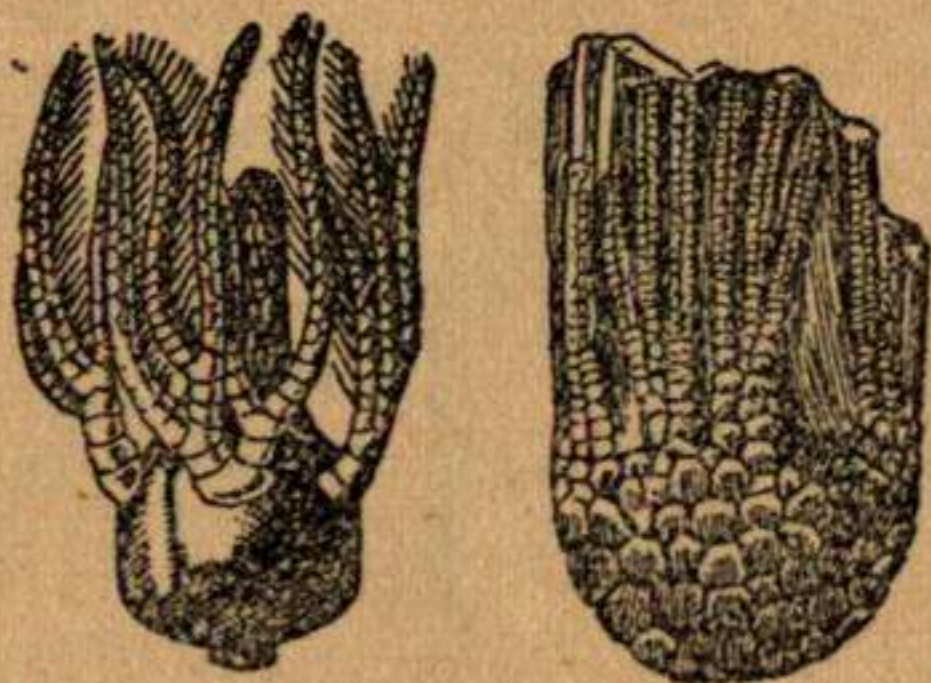


Fig. 67.—Crinoideos primarios.  
*Encrinus* y *Plathycrinus*  
(Hoernes).

plano y ancho y dividido longitudinalmente en tres lóbulos, de cuya circunstancia se deriva su denominación. Constituyen la nota más característica del Paleozoico, y sus variedades han servido para determinar la cronología de los niveles. Surgieron de improviso en el Cámbrico, para desaparecer antes del comienzo del Secundario (fig. 70).

Entre los Moluscos, cuyas clases evolucionan de un modo constante, sobresalen los Cefalópodos, pero difieren de las sepias y calamares en que tienen, como los Nautilus actuales, una concha exterior dividida en cámaras y el animal vive en la últimamente

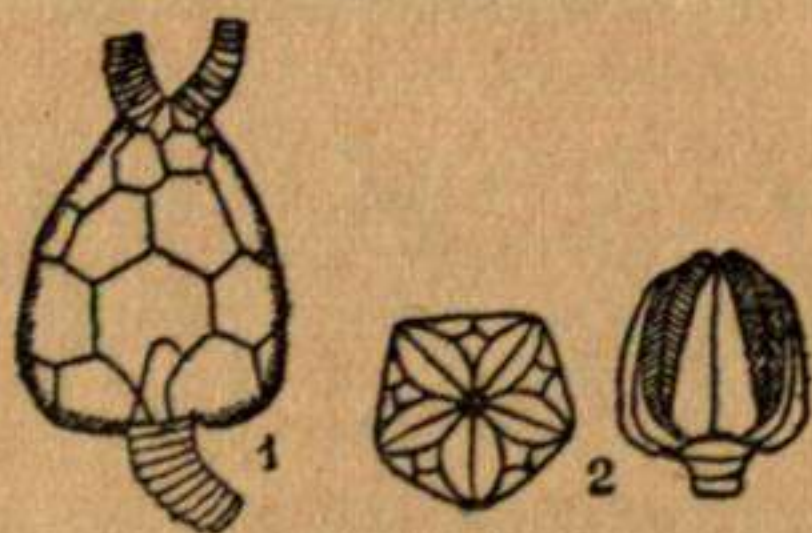


Fig. 68.—Crinoideos primarios; 1, pleurocistites;  
2, pentremites.

formada, que es la mayor. Al principio la concha es recta (*Orthoceras*), pero luego aparece arqueada y, finalmente, en espiral; pero estos últimos no alcanzan su apogeo hasta la Era Secundaria.

Los Peces estuvieron representados por la mayoría de sus diversos tipos. En plano preferente figuran los Placodermos, llamados así por su singular coraza óseodérmica que les cubría la cabeza y el tórax, dándoles un cierto parecido a las tortugas marinas.

En el último período concurren los primeros Batracios (*Branchiosaurus*), de tipo arcaico y de forma pare-



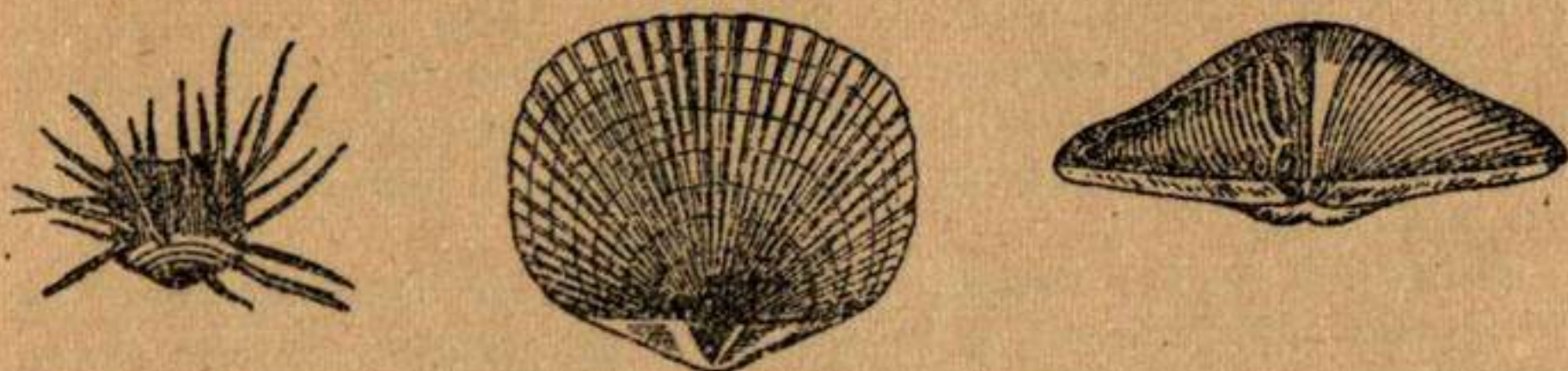


Fig. 69.—Braquiópodos paleozoicos; *Spirifer*, *Orthis* y *Productus* (San Miguel).

cida a la salamandra. Vivían en aguas encharcadas y alcanzaban una longitud de 15-20 centímetros (fig. 71). Finalmente comparecen los primeros Reptiles (*Protosaurus*), de forma de lagarto y tamaño que no excede al del caimán.

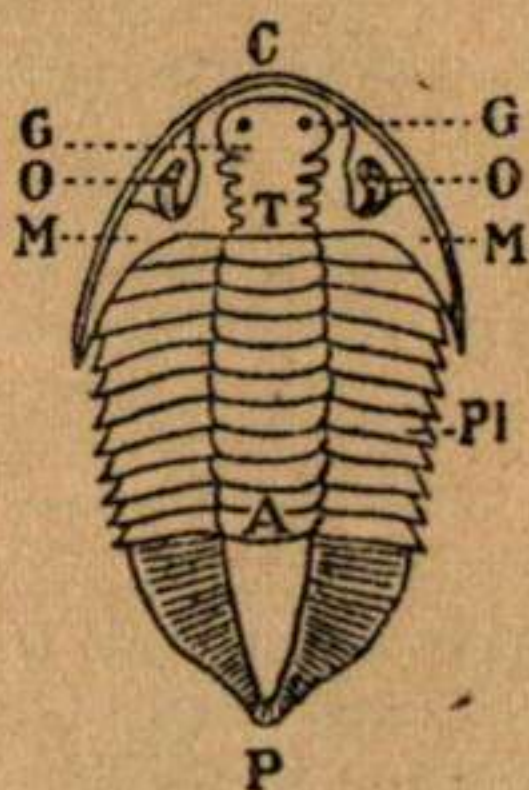


Fig. 70.—Trilobites restaurado (Dalmanites). C, cabeza; O, ojos; T, tórax; M, mejillas; A, abdomen; P, pleon (Colomb et Houlbert).

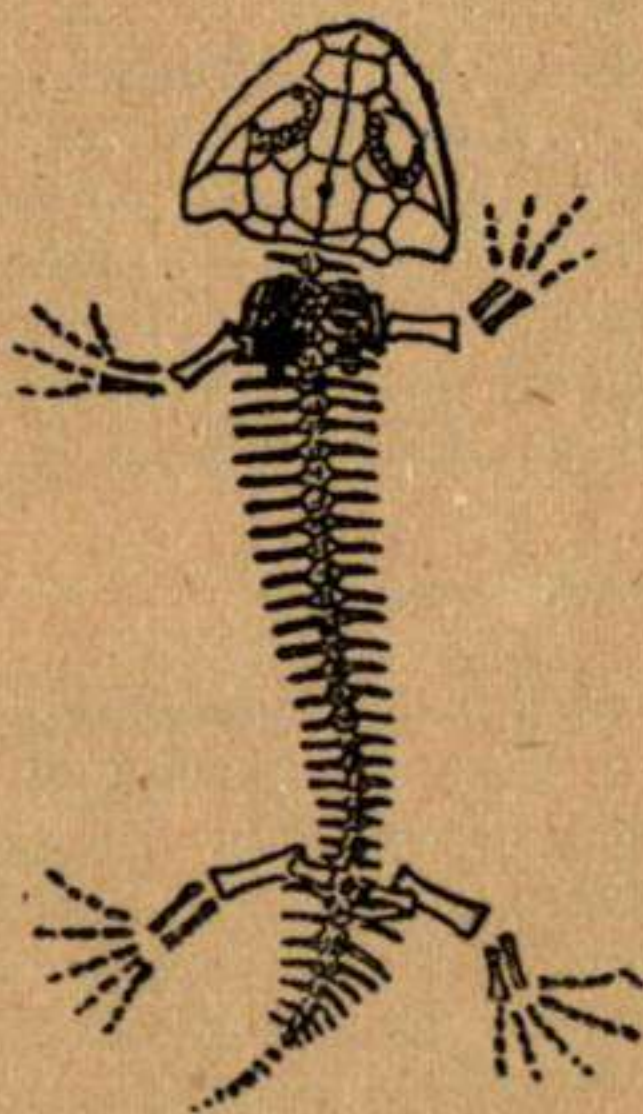


Fig. 71.—*Branchiosaurus*, batracio antracólico (E. Fraas).

### PERÍODOS DE LA ERA PRIMARIA

*Cámbrico*. — La fauna está representada por los diferentes tipos de los Invertebrados marinos, si bien en

géneros de organización sencilla. Destacan huellas de Anélidos y una extraordinaria abundancia de Braquiópodos, Moluscos y, sobre todo, Trilobites, cuyas especies no pueden arrollar el cuerpo. Carece de Vertebrados en absoluto.

*Silúrico.* — La fauna terrestre ofrece impresiones de Insectos inferiores; y la marina, el apogeo de los Nautiloideos y Trilobites de cuerpo arrollable. En los últimos pisos aparecen los Placodermos. Los Graptolites, que se inician al final del Cámbrico, constituyen la nota más destacada del Silúrico.

*Devónico.* — De Devon, Condado de Inglaterra. En la flora terrestre se encuentran las primeras Criptógamas vasculares. De la fauna desaparecen los Braquiópodos y Nautiloideos; en cambio se desenvuelven los Insectos del grupo de los Neurópteros e Himenópteros y los Peces en sus diversas formas.

*Antracolítico.* — La flora forma inmensos y frondosos bosques de Criptógamas vasculares y Gimnospermas, cuyos gigantescos cadáveres constituyeron los densos mantos de hulla continentales y neríticos.

De la fauna se extinguen los Placodermos, decaen los Trilobites, se desenvuelven aún más los Insectos, y por primera vez se registran Fusulinas y Gasterópodos terrestres, Batracios y Reptiles.

### Paleogeografía

*Clima.* — La escasez de calizas supone en el Cámbrico una temperatura relativamente baja; las formaciones coralinas y salíferas en todas las latitudes, señalan un estadio uniforme, más subido y seco en el Silúrico; el colorido rojo de ciertos sedimentos y la carencia de precipitaciones químicas atestiguan un clima tropical, pero no desértico, en el Devónico; y en el Antracolítico, la fronda exige un medio templado y húmedo, las areniscas rojas y salíferas lo piden cálido y seco, y los glaciares y plantas boreales demandan un ambiente crudo.

En cuanto a la concreción de zonas climáticas, los helechos arborescentes y arrecifes madreporicos en las actuales regiones polares indican que reinaría en ellas un clima tropical, al paso que los glaciares y los Glo-sopteris dan fe de un régimen frío en el Gondwana.

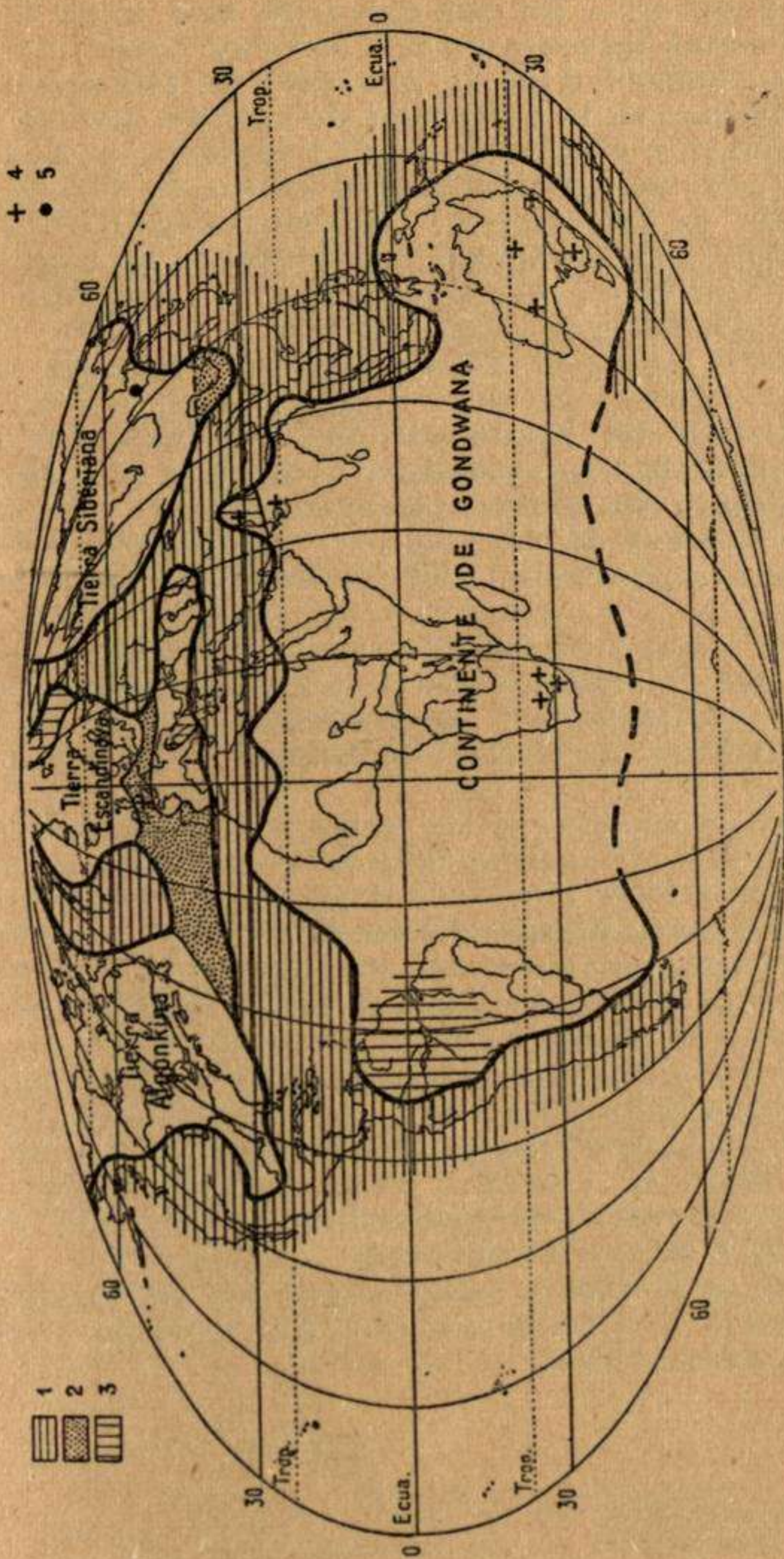


Fig. 72.—Mapa terrestre al final de la Era Primaria (Carbonífero), según Frech. 1, mares del Carbonífero inferior. 2, mares del Carbonífero medio. 3, mares del Carbonífero superior. 4, trazas glaciares permocarboníferas. 5, trazas glaciares cámbricas.

*Tierras y mares.* — En esta época, de muy larga duración, las fuerzas internas de la Tierra se muestran con una intensa actividad de la que derivan frecuentes y amplios cambios en la topografía de nuestro planeta.

La transgresión cámbrica invade una parte considerable de los terrenos emergidos, con lo que se reduce en gran manera la extensión de los continentes boreales, que aparacen concretados en tres núcleos: la *tierra algonquina* (Canadá y Groenlandia), la *tierra escandinava* (Escandinavia, Escocia, Gran Bretaña) y la *tierra siberiana* (Siberia Central), separadas unas de otras por el mar.

El continente del hemisferio Sur continúa con sus contornos confusos e indecisos, hasta que por fin la flora de *Glosopteris* permite señalar el área definitiva del Gondwana con la América del Sur, África, Madagascar, India y Australia, perfectamente soldadas entre sí.

Al propio tiempo se van perfilando cuencas oceánicas en el sentido de los paralelos; una de ellas, el *Tetys*, parece ya definitiva en el Carbonífero, en ancho anillo que separa las masas continentales nórdicas y australes.

Con el gran desarrollo de la fauna, los mares del Primario cobrarían un aspecto muy distinto de los agnostozoicos, sobre todo cuando las aguas se vieron surcadas por los peces de tamaño vario y el fondo se enriqueció con especies de notable magnitud y nuevas formas. Hasta más allá de la primera mitad del Paleozoico, los continentes continúan desolados como antes; pero ya en el Devónico, y especialmente en el Antracolítico, las altas cordilleras varían por completo la tonalidad del paisaje; valles profundos contrastan con montañas elevadas y planicies aluviales pantanosas, y las tierras se ven cubiertas por extensas manchas de fronda animadas por el ajetreo de numerosos insectos.

La vida de la Tierra, en todas sus facetas, entra ya en una fase precursora de la plenitud que será alcanzada en tiempos más recientes.

## CAPÍTULO XVII

### ERA SECUNDARIA. EDAD DE LOS REPTILES

El Secundario o Mesozoico puede considerarse, en todos sus aspectos, el período de tránsito entre la antigüedad geológica y los tiempos actuales. Representa en Geología lo que el Medioevo en la historia de la Humanidad. Desaparecen muchos de los extraños seres de la Era Primaria y son substituídos por otros no menos monstruosos pero más próximos por su organización a los tipos biológicos actuales. Aparecen las aves y los primeros mamíferos; los continentes se animan con profusión de reptiles que suceden a las formas arcaizantes que aparecen al finalizar el Paleozoico; son los mayores monstruos que ha visto la Tierra y pueblan el aire, el mar y el suelo. El mundo vegetal se desarrolla en términos que no difieren mucho de los que hoy observamos. Se rellenan con finos depósitos margosos las cuencas encerradas en las montañas primarias, y la caliza se sedimenta en espesores enormes aprovechando la tranquilidad tectónica apenas perturbada en el transcurso de la Era; son los materiales de construcción de los futuros plegamientos alpinos; es el momento de descanso que aprovecha la Tierra para prepararse a los últimos esfuerzos que han de llevarla a la configuración actual.

El Mesozoico comprende los terrenos sedimentarios depositados sobre los paleozoicos con anterioridad a las formaciones que contienen los fósiles llamados *Nummulites* que señalan el comienzo de la Era Terciaria. Se divide en los sistemas *Triásico*, *Jurásico* y *Cretácico*.

#### Caracteres litológicos

Los terrenos secundarios se caracterizan principalmente por el predominio de las calizas, las cuales alter-

nan con otras rocas detríticas, que con la riqueza y gradación de sus matices producen el variado y atractivo colorido abigarrado del paisaje de esta época, que contrasta vivamente con el tono gris obscuro y la monotonía del Paleozoico.

Las formaciones continentales son abundantísimas en el primer período; luego decrecen algún tanto, particularmente en Europa. Al comienzo de la Era se concretan en enormes espesores de conglomerados, areniscas, capas carboníferas con vegetales y vertebrados terrestres, con frecuentes huellas de reptiles y ondulaciones de playa o *ripplemarks*. En el Cretácico figuran formaciones ligníferas con moluscos de agua dulce y reptiles terrestres. Los depósitos lagunares son muy frecuentes e interesantes; abundan en el Triás, cuyas capas de yeso y sal común alcanzan considerable espesor.

Los depósitos marinos se manifiestan abundantemente en todos sus aspectos. Las facies litorales y neríticas desempeñan un buen papel en conglomerados, areniscas, etc.; las batiales se desarrollan extraordinariamente y constituyen los macizos calizos más potentes de nuestra superficie, y las abisales son de un valor muy relativo. La *creta*, tan profusa en el tercer período, se forma en aguas poco profundas, en un estadio intermedio entre el nerítico y el batial, con restos calizos de diversas especies animales.

### Caracteres geotectónicos

En la evolución de la Tierra, el Secundario representa una fase de placidez orogénica interpuesta entre otras dos de preponderante actuación de las fuerzas endógenas. Pero esa calma sólo puede entenderse en términos relativos, pues si bien no existen en la mayor parte de la Tierra plegamientos ni se crean nuevas cordilleras, en cambio persisten algunos movimientos de la corteza terrestre, especialmente en los fondos jurásicos del Mediterráneo y del Pacífico.

Las erupciones volcánicas, si bien siguen siendo intensas en los comienzos como si fueran el remate de las pérmicas, decrecen, no obstante, pronto y su aletargamiento se prolonga hasta el final del grupo, en que vuelven a despertarse para principiar con el manto de lava basáltica del Dekán (India), el más extenso

de los conocidos hasta hoy. Como consecuencia, las rocas eruptivas pierden la preeminencia que tuvieron en períodos anteriores.

En compensación, los fenómenos epirogénicos consiguen gran amplitud e intensidad. No faltan en el Triás, aunque discretos; en el Jurásico se inician la mayor parte de las tierras comprendidas entre las dos cadenas paleozoicas, mientras se levantan las mesetas y macizos hercinianos perfilando numerosas islas; pero aun es más interesante la transgresión mesocretácica por la que casi toda Europa, incluso la Meseta Ibérica, quedó sumergida en las aguas hasta mediados del sistema, en que el mar empieza a retirarse.

### Caracteres paleontológicos

La flora y la fauna secundarias guardan todavía muchos caracteres del Primario; pero cada vez más van adquiriendo las formas pertinentes al Terciario, que es como decir de la actualidad, y en algunos aspectos la vida consigue en sus manifestaciones una riqueza y vigor jamás igualados en los restantes períodos.

*Paleobotánica.*—Las Criptógamas vasculares arborescentes pierden la lozania y frondosidad que antes tuvieran, alcanzando sólo cierto desarrollo los helechos. En cambio, las Gimnospermas (plantas con semillas, pero sin flores: pinos, etc.) entran en la plenitud de su reinado, particularmente las Cicadineas y Coníferas. Se manifiestan pronto algunas plantas con flores (Fanerógamas) y al final comparecen algunos tipos arbóreos de los tiempos actuales; pero todas ellas pertenecen todavía a las Monocotiledóneas o plantas con las semillas de un solo cotiledón.

*Paleozoología.*—El mayor progreso corresponde a la fauna, en la cual se estilizan varios rasgos distintivos del Mesozoico. Han desaparecido los Trilobites, Placodermos, etc. Contrariamente, los tipos del Primario proyectan sus representantes acrecidos con nuevas formas y aun surgen otras sin antecedentes de ninguna clase.

Entre los Cefalópodos destacan los *Ammonites* y *Belemnites*, que por sí solos personalizan todos los terrenos secundarios; principian con un máximo desenvolvimiento seguido de una rápida decadencia y una extinción total antes de iniciarse el Terciario. Los Ammo-

nites (fig. 73) tienen su raíz en el Paleozoico; al principio no difieren mucho de los *Nautilus* primarios, pero en el Jurásico presentan sus tabiques prolijamente sinuosos y alcanzan el máximo volumen, que en algunos es el de una rueda de molino de un metro de diámetro. En el último sistema decaen y pierden su forma en espiral para volver a la rectilínea que tuvieron antes. Los *Bellemnites* se improvisan en el Secundario; tenían una concha recta, cónica y maciza como una barra de tiza, la cual quedaba englobada en el manto por el estilo del hueso de las sepias. Eran semejantes a éstas y a los actuales calamares, aunque de mayor tamaño, pues los hubo que llegaban a los dos metros de longitud (figuras 74 a 76).

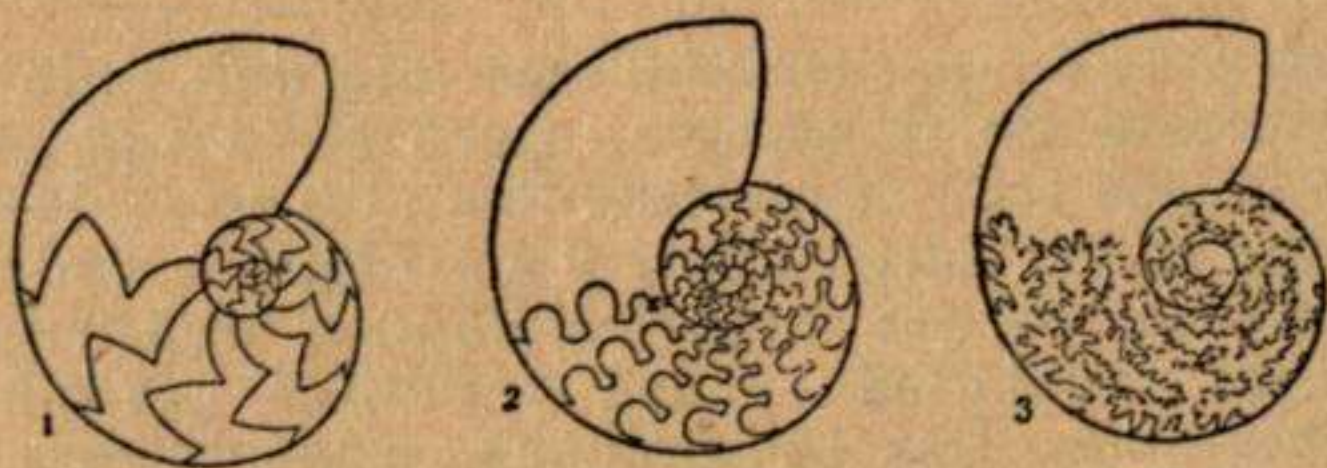


Fig. 73.—Ammonítidos que muestran los diversos grados de complicación de los tabiques: 1, *Goniatites*; 2, *Ceratites*; 3, *Ammonites* (Boule).

Los moluscos bivalvos presentan gran riqueza y variedad de *Ostreidos*; pero, además, incluyen a los *Rudistidos*, que con sus especies de *Hippurites* y *Radiolites* facilitan documentos propios y exclusivos del Cretácico. Las dos valvas eran disimétricas; la concha inferior cónica, curvada, bastante larga, lisa o con estriás exteriores, y estaba fija en el suelo; la valva superior era pequeña y obraba como tapadera u opérculo. Los otros moluscos ya no difieren mucho de los actuales (fig. 77).

Entre los Corales se distinguen los *Cyclolites*, de máximo desarrollo; de los Braquiópodos, únicamente quedan los géneros *Terebratula* y *Rhinconella* (fig. 78); en el grupo de los Peces hacen su aparición los *Teleosteos* o con esqueleto óseo, y los Batracios evolucionan hacia formas existentes hoy día; aparece en Cataluña el género *Rana*.



Los Reptiles constituyen la nota más destacada del Mesozoico, tanto por su monstruosidad como por las formas insospechadas e inverosímiles que invadieron la Tierra. Unos son nadadores y guardan parecido con los delfines y las focas, distinguiéndose entre ellos el *Ictyosaurus*, de 10 a 12 metros de longitud, y el *Plesiosaurus*, que alcanzaba hasta 15 metros; tenían aletas



Fig. 74.—Cefalópodo secundario: Belemnites (San Miguel).

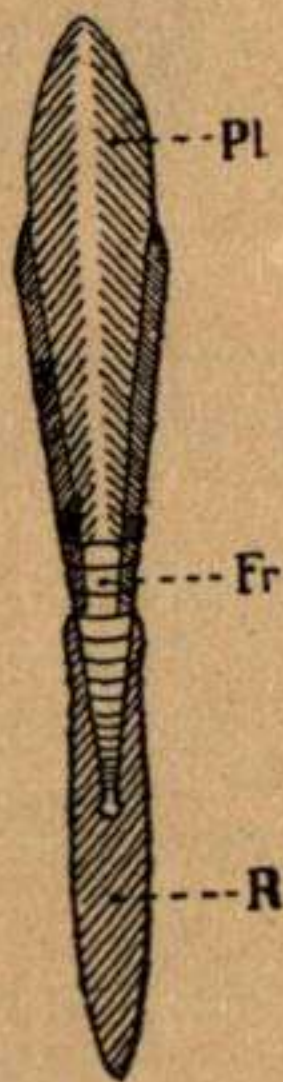


Fig. 75.—Concha completa de Belemnites. *Pl*, pluma. *Fr*, fragmocono. *R*, rostro (Boule).

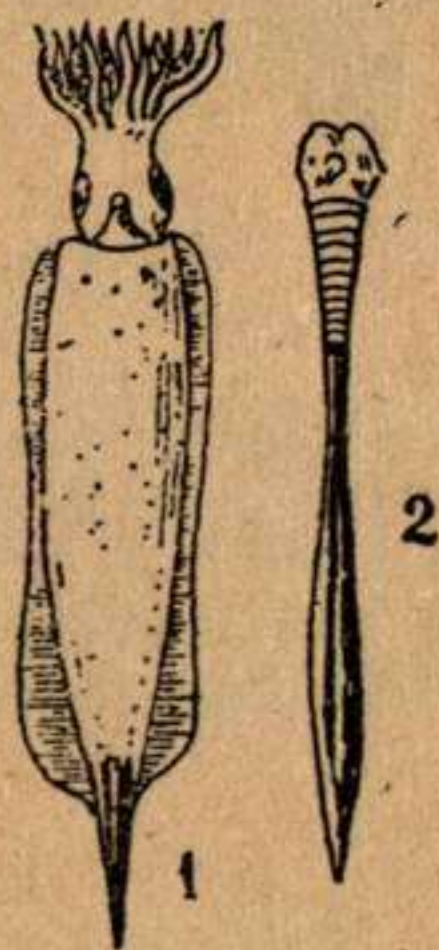


Fig. 76.—Belemnites restaurado (1) y concha de Belemnites vista de perfil (2) (E. Fraas).

nadadoras como los mamíferos acuáticos citados. Los reptiles voladores se parecían también a los mamíferos voladores, los murciélagos, y como éstos tenían las extremidades anteriores convertidas en alas mediante una amplia membrana desarrollada entre los dedos y el cuerpo; se citan el *Pterodactylus*, del tamaño de un cuervo, y el *Rhamphorincus*, de pico bastante largo. Los reptiles terrestres fueron los gigantes del mundo; su marcha era parecida en algunos a la de los Canguros, por tener las patas delanteras menos desarrolladas que

las posteriores y una gran cola. Se señalan el *Atlantosaurus*, el mayor de todos, que constituía una mole de 40 metros de largo; el *Brontosaurus*, de 18 metros, y el *Diplodocus*, de unos 25 metros. Otros tenían las patas



Fig. 77.—Moluscos secundarios: Rudistidos. 1, Hippurites. 2, Requienia. 3, Diceras. 4, Monopleura (San Miguel).

igualmente desarrolladas, marchando como el rinoceronte; eran el *Triceratops*, monstruo cuya cabeza, provista de tres grandes cuernos acerados, medía 2 metros. En su mayoría eran herbívoros y, por el escaso desarrollo de la cabeza en relación con las dimensiones

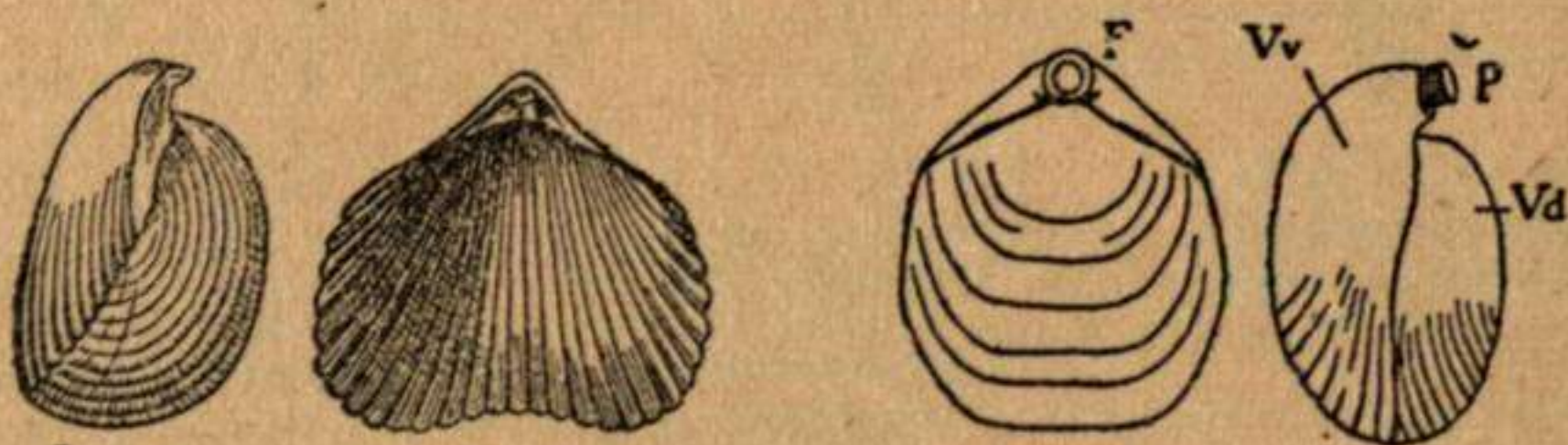


Fig. 78.—Braquiópodos secundarios: *Rhynconella* y *Terebratula*. Vv, valva ventral; Vd, valva dorsal; P, pedúnculo; F, foramen (San Miguel).

del cuerpo, se les supone de escasa inteligencia, con lo cual les fué difícil asegurar su existencia.

Otra nota muy característica la proporciona la aparición de las primeras aves hacia la mitad del Secundario. La más antigua es el *Archæopteryx lithographica* (fig. 81) encontrado en las capas de caliza litográfica de Baviera. Su constitución es intermedia entre la de

los reptiles y las aves actuales; poseía pico, pero tenía dientes; las plumas estaban muy separadas y las extremidades anteriores conservaban todavía las uñas como los reptiles. Siguieron nuevos tipos más cercanos a las aves, entre otros la *Hesperornis*, de un metro de altura y parecida al avestruz, y la *Ichthyornis*, de vida análoga a las gaviotas, pero aun provistas de dientes.

Finalmente, figuran los primeros mamíferos, aunque escasamente desarrollados y en formas sencillas e inferiores; fueron marsupiales como el canguro, de la talla máxima de un conejo; se cita como más antiguo el *Dromatherium*, al que muy pronto se sumaron otros géneros.

#### PERÍODOS DE LA ERA SECUNDARIA

*Triásico*.—Llamado así por constar en la mayor parte de Europa de tres pisos: conglomerados y areniscas de cemento rojo, en la base, calizas conchíferas en el centro y margas irisadas en la cúspide. El Triás alpino no conserva con rigor esta sucesión estratigráfica. Los mayores depósitos de yeso y sal corresponden a este sistema.

Las Gimnospermas adquieren gran expansión y predominio, mientras las Criptógamas vasculares decaen. En la fauna han desaparecido los Trilobites y la mayoría de los Braquiópodos paleozoicos; en cambio abundan los Anfibios, se desarrollan los Ammonites y comparecen bruscamente los Belemnites, Tortugas, Dinosaurios y pequeños Marsupiales.

*Jurásico*.—Muy desarrollado en las montañas del Jura (Francia). Dominan las calizas de todo orden, siendo de notar que las coralíferas se extienden por toda Europa y que las litográficas son propias de este período.

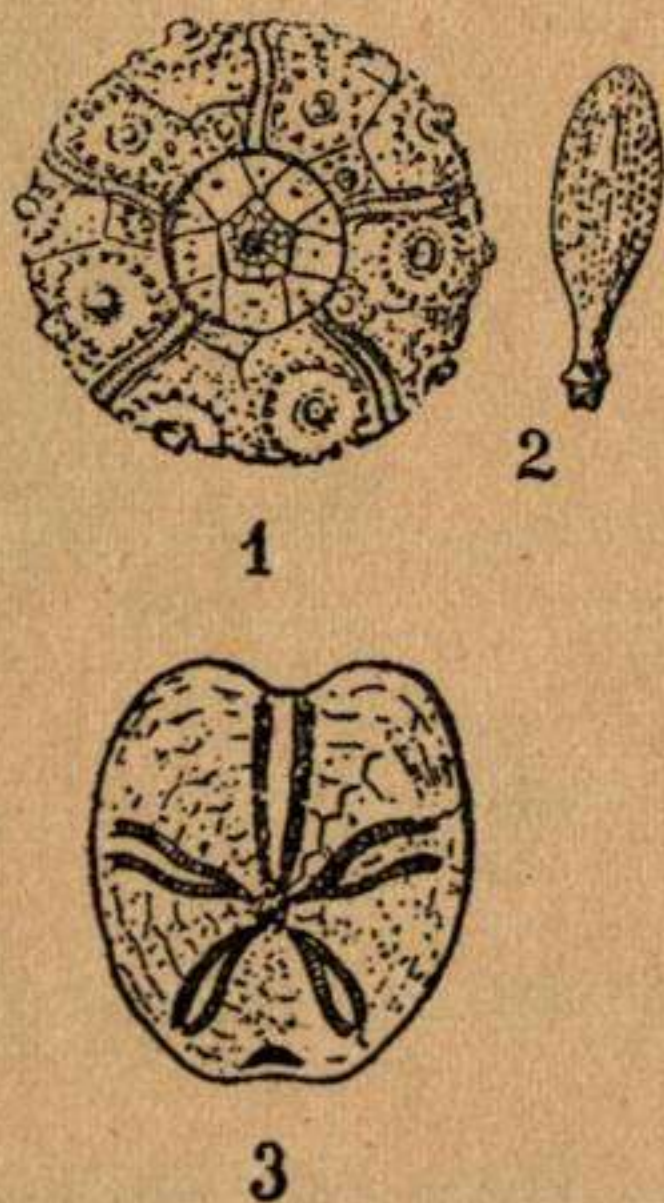


Fig. 79. — Equínidos secundarios (E. Fraas); 1, cidaris; 2, púa de Cidaris; 3, Micraster.

En la flora persisten los Helechos como sobrevivientes de sus congéneres paleozoicos; las Gimnospermas alcanzan la plenitud de su reinado y aparecen las Monocotiledóneas.

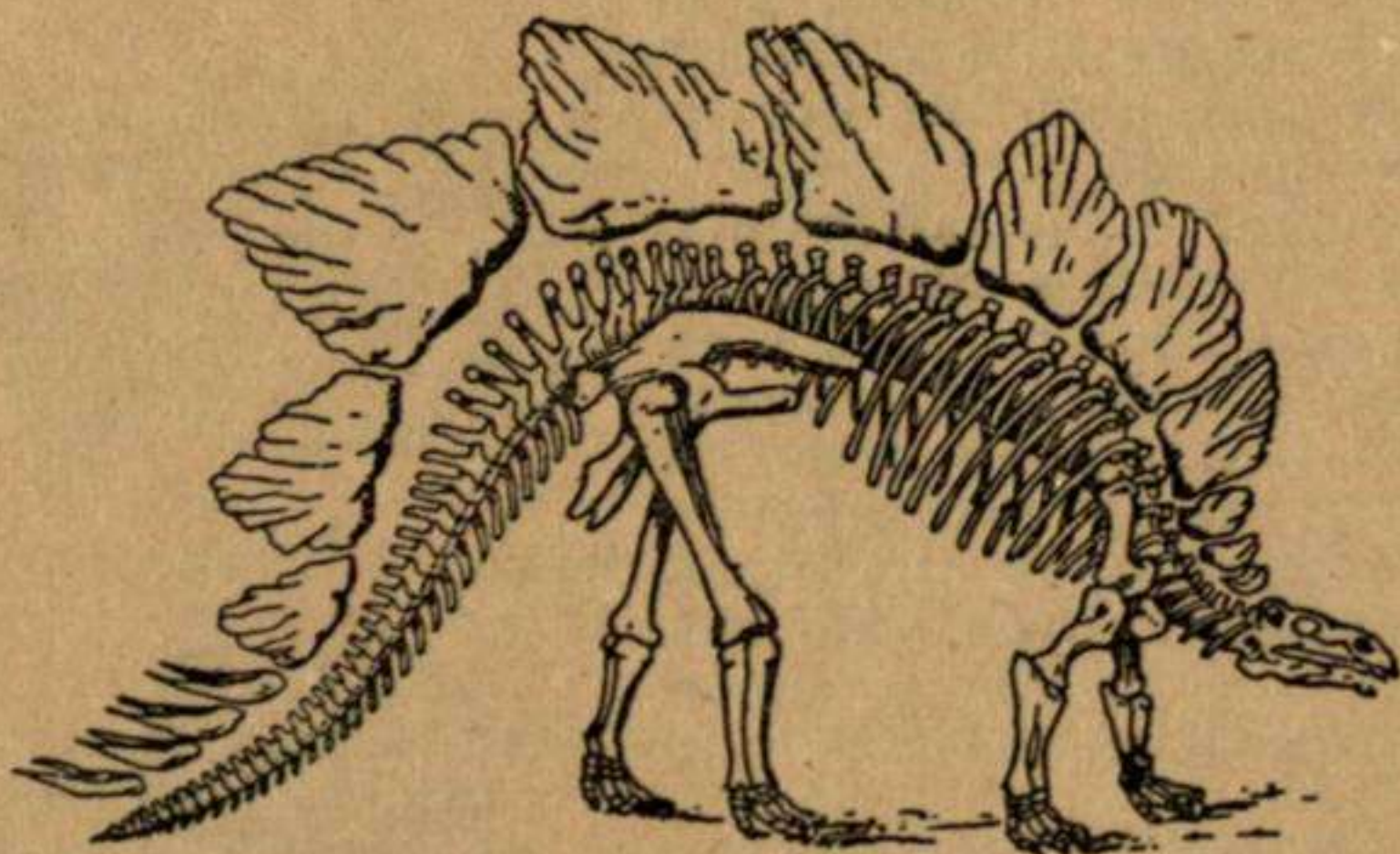


Fig. 80.—*Stegosaurus*, reptil marchador (10 metros)  
(Colomb et Houlbert).

La fauna se sitúa por la máxima concurrencia de los grandes reptiles, por la inauguración del tipo Aves con el *Archæopteryx*, por la comparecencia de los primeros Anuros (*Rana*) y Teleósteos, por la extraordinaria preponderancia de Ammonites y Belemnites y por el notable aumento de los Marsupiales.

*Cretácico*.—Su nombre se debe a la creta, abundante en el piso superior, el primero que fué estudiado. La flora es parecida a la Jurásica, pero se enriquece con las Dicotiledóneas, cuyos tipos se acercan ya a los actuales.

La fauna se caracteriza por el máximo desenvolvimiento de los Ciclolites, por la presencia de los Rudistitos, de los primeros Urodelos, del Iguanodón y Triceratops y de las aves *Hesperornis*, *Ichthyornis*, etc.

### Paleogeografía

*Clima*.—El color rojo de ciertos depósitos, los yacimientos salíferos, la abundancia de calizas, en especial

las coralinas y dolomíticas, y la ausencia de glaciares, señalan para el Triásico un clima, en general, cálido y seco.



Fig. 81.—*Archæopteryx lithographica*, ave jurásica  
(Steinmann et Doedelein).

En el Jurásico aparecen anillos en el tronco de las Araucarias. De este hecho se deduce un enfriamiento de las tierras boreales en que vivía dicha planta, el juego variable de las estaciones con alternancias periódicas de calor y frío, y la existencia de zonas climáticas.

*Tierras y mares.*—En el hemisferio Norte, las masas continentales del Primario persisten en el Mesozoico,

con algunas modificaciones. El escudo siberiano se desenvuelve y llega a abarcar casi toda el Asia, formando el continente *Chino-Siberiano*. Las tierras algonquina y escandinava parece que estuvieron unidas la mayor parte de esta Era, como así lo confirman una flora y una fauna idénticas en ambos bloques, por lo que constituirían el continente Nordatlántico, separado del anterior por un brazo de mar que bordeando los Urales irrumpiría muchas veces sobre la planicie rusa.

En el hemisferio Sur, los cambios son más profundos. El Gondwana queda escindido por un brazo de mar jurásico que tiende a separar una gran área de las tierras orientales, en cuya virtud se hacen ostensibles dos continentes, el *Africano-Brasileño* y el *Australo-Indo-Malgache*.

Al propio tiempo, un conjunto de mares profundos, en comunicación constante entre sí, llenaría el espacio correspondiente a las cadenas alpinas terciarias. Entre aquéllos estaba el *Tetys*, que se extendía desde las Antillas hasta Nueva Zelanda, pasando por el Mediterráneo, Persia, India actual e Insulindia.

Las montañas hercinianas, por efecto de la erosión, al comenzar el Secundario aparecen ya reducidas a peniplanicies, que con frecuencia son invadidas por el mar en los movimientos epirogénicos. Pero la transgresión más importante es la mesocretácica, un verdadero desbordamiento marino que atañe a ambos hemisferios y por el que la mayor parte de las áreas continentales quedaron sumergidas durante largos siglos.

En esta época, el aspecto de la Tierra debe de ser muy distinto del Primario: las aguas se ven surcadas por inmensas bandadas de peces de todas clases y tamaños y por los monstruosos reptiles nadadores; cruzan el espacio las primeras aves y los saurios de forma impresionante adaptados al vuelo, y la tierra firme, en su placidez, pierde la monotonía con los mantos de verdor que se extienden por todas las latitudes; y aun, en ciertos parajes, la aglomeración de los gigantes y monstruosos reptiloides comunican al cuadro una verdadera y emocionante visión dantesca.

La Tierra vislumbra ya el período de madurez de sus fuerzas que la llevará a la configuración actual.

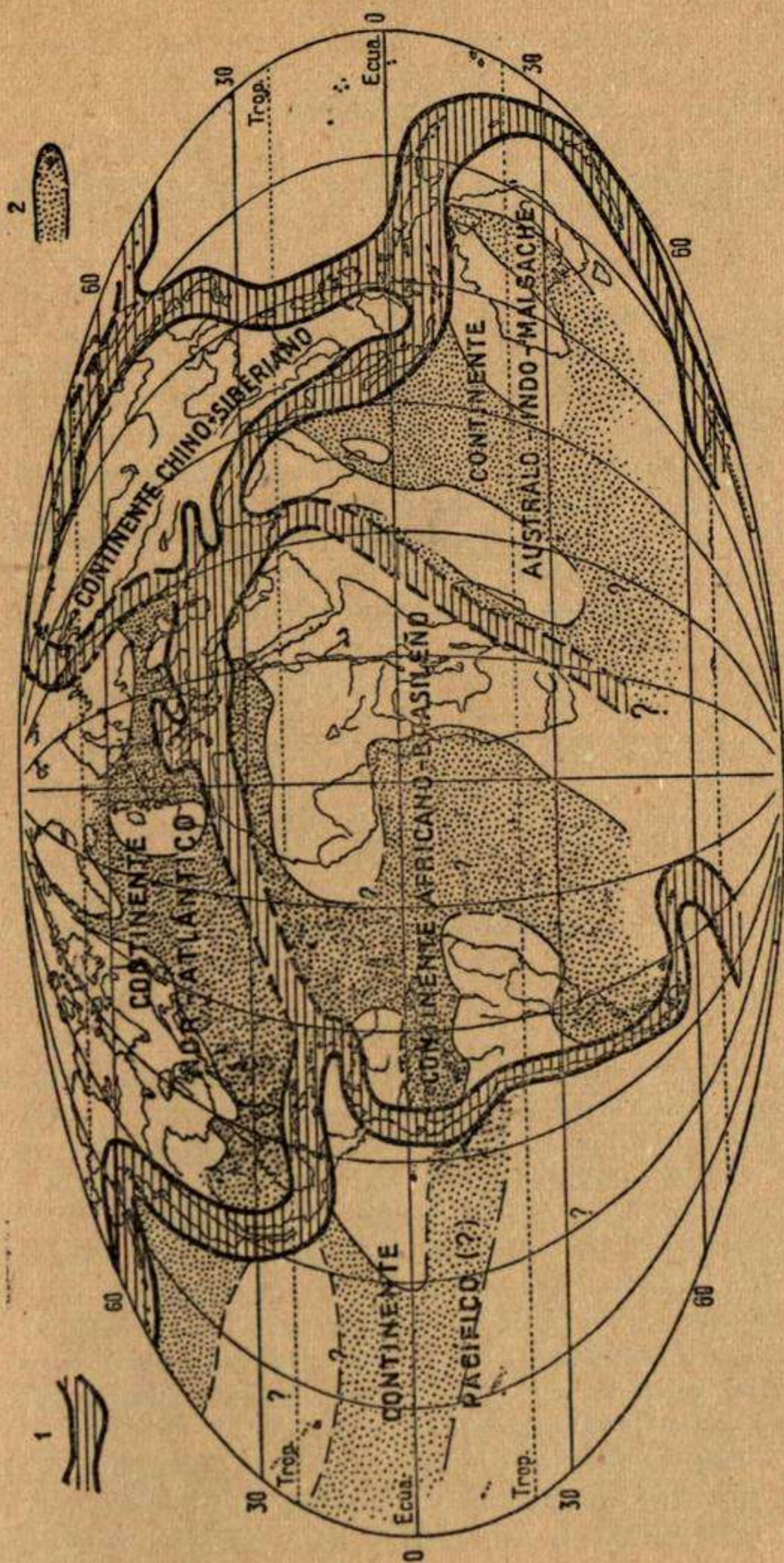


Fig. 82.—Mapa terrestre de la Era Secundaria (Haug), 1, geosinclinales secundarios. 2, transgresión cenomanense sobre las plataformas continentales.

## CAPÍTULO XVIII

### ERA TERCIARIA. EDAD DE LOS MAMÍFEROS

El Terciario corresponde ya a la edad madura o modernidad en la historia de la Tierra, en la que la obra que se construye posee los caracteres de la actualidad.

En esta Era tienen lugar los movimientos de mayor potencia; el roquedo está integrado por toda suerte de elementos sin predominio de los unos sobre los otros; los vegetales consiguen expansionarse con la amplitud y riqueza específica de la flora reciente, y los animales evolucionan y alcanzan las formas de una organización compleja y variada como en nuestra época, en especial en el sector de los Mamíferos, que llegan al apogeo de su desarrollo.

El Terciario comprende los terrenos sedimentados después del cretácico y antes de que aparecieran los glaciares y aluviones cuaternarios. Comprende dos sistemas: el *Eogeno*, designado por algunos por *Nummulítico*, con dos series, el *Eoceno* y *Oligoceno*, y el *Neogeno*, también con dos series: *Mioceno* y *Plioceno*.

#### Caracteres litológicos

Como nota general puede decirse que las calizas marinas, tan desarrolladas y abundantes en el Secundario, disminuyen su papel; las coralíferas van limitando cada vez más el área de su influencia hasta circunscribirse a la zona ecuatorial. Contrariamente, con el acrecentamiento del poder erosivo y de la perturbación de las aguas a causa de la formación de las grandes cadenas montañosas, abundan toda clase de rocas detríticas: conglomerados, areniscas, arcillas, etc. Por la propia causa, las rocas efusivas, especialmente los basaltos, adquieren gran desarrollo.

Entre los depósitos continentales descuellan los lacustres con mantos salíferos y con frecuentes restos de mamíferos, moluscos e insectos. Son interesantísimos



los formados en las cubetas lagunares que se ciñen en los bordes de las cuencas afectadas por extensos movimientos epirogénicos, como la angloparisiense entre otras. A su amparo se amontonan los restos vegetales, que se transforman en lignito; fermentan los cadáveres de animales que en grandes masas encontraron una muerte repentina con el cambio de salinidad, para convertirse en materia bituminosa o petrolífera, y con la evaporación se precipitaron grandes masas de yeso, sal común y otras sales solubles. Como ejemplo de estas formaciones están las de sal común de Wieliezka (Polonia), cuyo sondeo arroja 14.000 metros, las de Cardona (España), de 734.000 metros cuadrados de superficie y más de 180 metros de espesor, y las de sales potásicas de Suria, no lejos de Cardona, de bastantes kilómetros cuadrados de extensión.

### Caracteres geotectónicos

Las fuerzas endógenas, largo tiempo adormecidas, despiertan de repente con una energía no superada hasta ahora. Al comenzar la Era, se inicia un potente impulso orogénico que comprime los estratos del fondo mediterráneo o *Tetys*, situado entonces un poco al Norte del actual Mediterráneo, entre las moles resistentes del continente de Gondwana, al Sur, y el de Eurasia, al Norte; se remozan los Pirineos y los Alpes y un vasto movimiento elevatorio tiene lugar en el emplazamiento del antiguo *Tetys*, a la vez que con el esfuerzo se quiebran y doblan los bordes de los topes de prensa europeo y africano que han entrado en colisión.

El trastorno continúa en el Oligoceno, aunque con menor intensidad; pero al llegar al Mioceno se acrecienta y amplifica; el continente de Gondwana se lanza sobre Europa, arranca los sedimentos del fondo del *Tetys*, que con el empuje se caen sobre los bordes de los bloques continentales que lo comprimen, y hasta con la persistencia del empuje son arrastrados centenares de kilómetros lejos de donde se depositaron y donde los pliegues tienen sus raíces. Los enormes depósitos acumulados durante el Mesozoico en el *Tetys* son levantados para enhiestar los Alpes, Pirineos, Cordilleras Béticas, Apeninos, Cárpatos, Balcanes, Cáucaso, Himalaya, etc.

Los pliegues se corren hasta el Gran Océano, y de las profundidades del Pacífico arrancan con altivez impresionante los Andes y las restantes cordilleras que bordean sus aguas. En el paroxismo tectónico se hunden continentes, afloran nuevas tierras antes sumergidas, el mar avanza y retrocede con insistentes alternancias, la actividad volcánica es más enérgica; menudean las fracturas, desgajes y corrimientos; se dibujan nuevos perfiles del relieve que con ligeros retoques se planea hoy ante nuestra vista. Éste es el llamado *plegamiento alpino*.

### Caracteres paleontológicos

La flora y la fauna son ya muy parecidas a las de nuestros días. En la primera cesa el reinado de las Cicadineas y Coníferas y entran en auge las Angiospermas o plantas con flores, con su rica gama de géneros y especies.

Del mundo animal han desaparecido los grandes reptiles, las aves con dientes, los Ammonites, Belemnites y Rudistos. Los Braquiópodos y Cefalópodos traspasan su predominio a Moluscos Lamelibranquios y Gasterópodos y se expansionan los Mamíferos, en especial los Caballos.

Los Nummulites y los Mamíferos son las dos notas más destacadas de la fauna terciaria. Los Nummulites son Foraminíferos que tienen la concha discoidal (a eso alude su nombre), formada por una espira cuyas paredes están profusamente perforadas. Vivieron en el Carbonífero, se desplazan del Secundario y reaparecen en el Eogeno, con tal empuje que llegan hasta conseguir el tamaño de una moneda de cinco pesetas; luego decrecen en diámetro y la mayoría de variedades quedan extintas al finalizar el Eoceno. Por su rápido desenvolvimiento y variedad de formas, son los fósiles que se emplean para fijar la cronología y sucesión estratigráfica de los terrenos eogénicos.

En los Mamíferos, el progreso ha sido extraordinario; se conocen todavía algunos Mamíferos primitivos, como los Marsupiales, pero pronto van compareciendo representantes de los diversos tipos. Entre éstos son muy notables algunos ejemplares de principios de la Era, los cuales resultan ser el tronco originario de familias dife-

rentes, según se deduce por presentar caracteres intermedios entre grupos más tarde completamente diferenciados. Tal es, por ejemplo, el *Phenacodus*, que no excedía del tamaño de un lobo, con hocico alargado como los Paquidermos, cinco dedos con uñas, y caracteres de Carnívoro, Rinoceróntido y Équido. Después de estas formas arcaicas, las distintas familias de Mamíferos se presentan ya con caracteres bien definidos.

En el grupo de los Mamíferos cuyos dedos terminan envueltos en pezuñas cabe estudiar algunas particularidades que señalan la evolución sufrida por los Perisodáctilos, o Mamíferos con un número impar de dedos en las extremidades (*Tapiridos*, *Rinoceróntidos*, *Équidos*), los Artiodáctilos, con número de dedos par (*Suidos* y *Rumiantes*) y los Proboscídeos.

Estudiemos como ejemplo la evolución sufrida por los Équidos, los cuales constituyen uno de los grupos más interesantes de los Mamíferos terciarios. Tienen su raíz en especies como el *Phenacodus*, con cinco dedos en las patas, y se conocen los distintos términos de tránsito que acreditan su evolución hasta llegar al caballo actual con un solo dedo. En las distintas especies

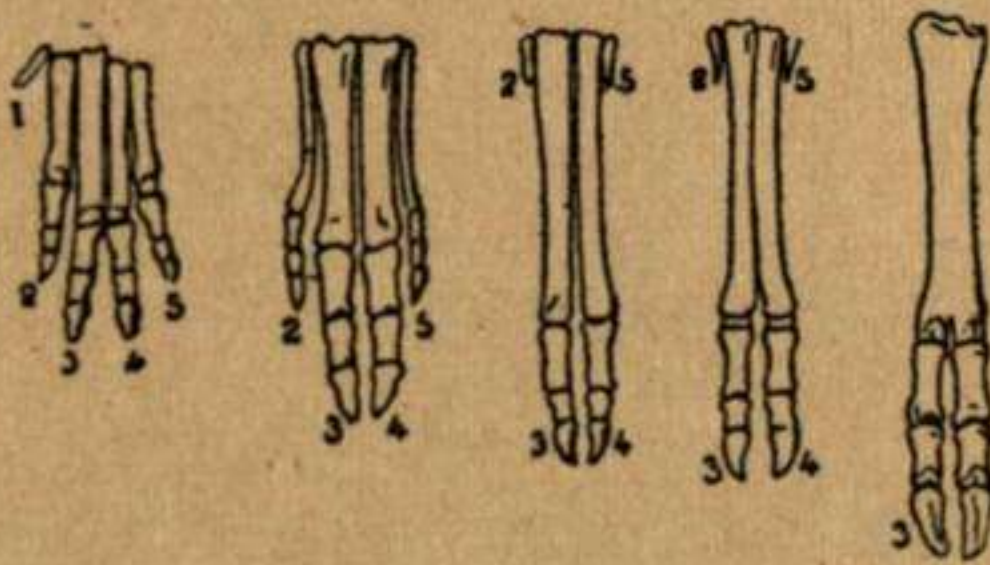


Fig. 83.—Evolución de los Rumiantes.  
*Orcodon*, *Hyæmoschus*, *Xiphodon*,  
*Prodromotherium* y *Ovis* actual  
(Boule).

que aparecen sucesivamente, los dedos laterales de las patas se van atrofiando mientras se desarrolla el central con su gran pezuña; al propio tiempo varía simultáneamente la dentición, que de fase omnívora adquiere la forma propia de los seres herbívoros, y el tamaño aumenta progresivamente. En la serie evolutiva, el *Pro-*

*tohipus* y el *Hipparion* son los antecesores más cercanos al *Equus* o caballo actual que apareció en el Plioceno.

Algo parecido se observa en las series evolutivas de los Artiodáctilos, en los cuales los cinco dedos de las formas arcaicas se reducen progresivamente a los dos que poseen actualmente las cabras, ovejas, etc. En los Proboscídeos, su primer representante, el *Maeritherium*, carece de trompa y posee cuatro caninos bien desarrollados; luego aparecen otros con una trompa incipiente

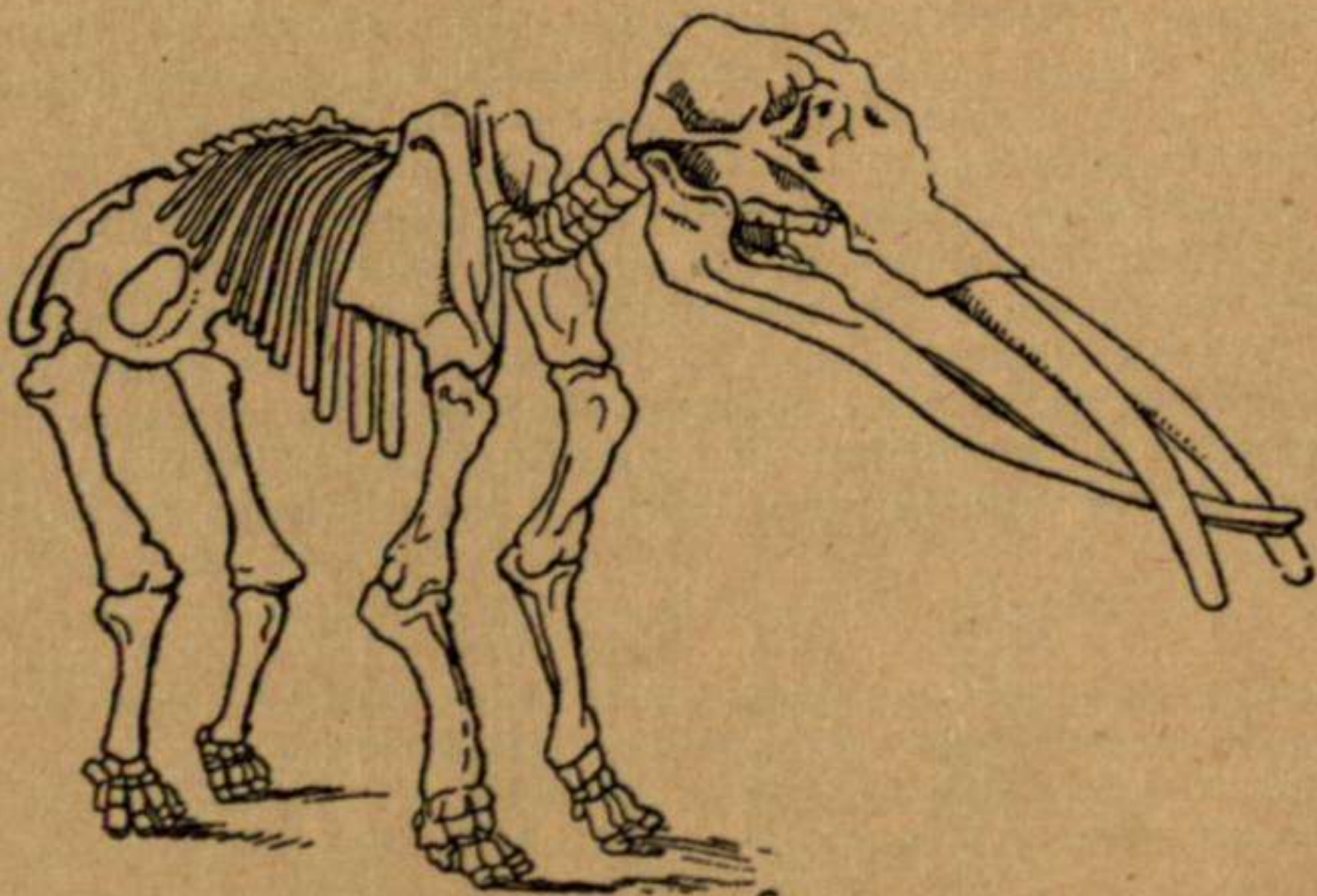


Fig. 84.—*Mastodon angustidens*, proboscídeo miocénico (San Miguel).

y cuatro defensas cortas; el *Mastodonte* posee ya enormes defensas, y el *Dinotherium* una trompa larguísima y, finalmente, aparece el género *Elephas*, precursor de los elefantes actuales.

De los Mamíferos cuyos dedos terminan en uñas (*Carnívoros*, *Cuadrúmanos*, etc.) se conocen también bastantes ancestrales. Los *Lemúridos* se esparcían entonces por el antiguo continente; el *Driopithecus* es un antropoide semejante al Chimpancé actual, y el *Pithecantro-*

pus de la isla de Java es el orgánicamente menos alejado del ser humano.

### PERÍODOS DE LA ERA TERCIARIA

*Eoceno.* (De *Eos*, aurora, y *Cenos*, reciente.) En la flora se destacan las Palmeras y árboles de hojas caducas; plantas tropicales y subtropicales ocupan elevadas latitudes.

En la fauna consiguen gran predicamento los Gasterópodos y Lamelibranquios; los Mamíferos inauguran su diferenciación; aparecen Cetáceos y Sirenios, y las Aves alcanzan un aspecto muy similar al actual. La principal característica estriba en los Nummulites, que adquieren el máximo desarrollo.

*Oligoceno.* (De *Oligon*, poco.) Es continuación del anterior; la flora es más nutrida; los Nummulites desaparecen pronto; abundan los Gasterópodos, Lamelibranquios, Briozoos, Equínidos, etc.; aparecen los Rinocerontes sin cuernos, el Paleomasotodonte, etc.

*Mioceno.* (De *Meion*, menos.) Dominan las molasas o calizas areniscosas, duras o deleznales, con intercalaciones de margas, y los *falums* o areniscas de playa con restos de moluscos.

En la flora sobresalen por su desarrollo algas de aspecto pétreo (*Lithothamnium*), gramíneas y varias especies arbóreas, sobre todo la *Sequoia*, que en frondosos bosques invadió el hemisferio septentrional, siendo, como en el Oligoceno, el origen principal de los lignitos.

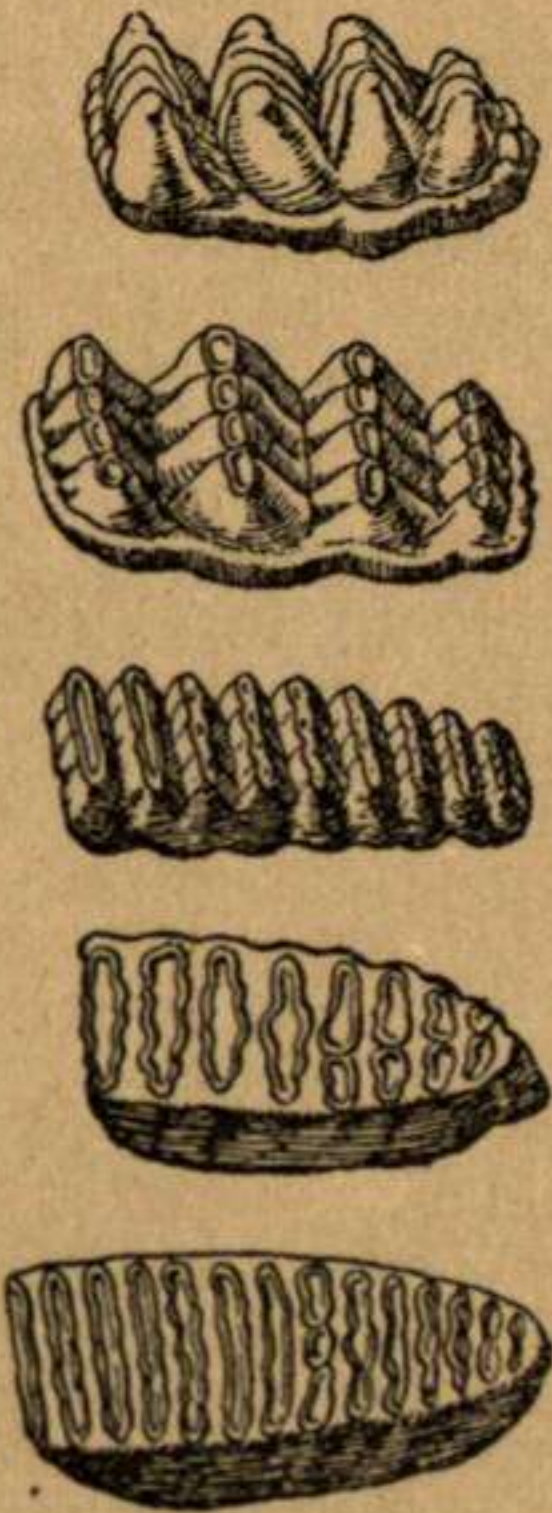


Fig. 85. — Evolución de los molares de los Proboscídeos. Los tres superiores son de Mastodontes miocénicos y pliocénicos; los dos inferiores pertenecen al género *Elephas* (Boule).

Los Mamíferos experimentan transformaciones y son visibles el Hipparion, Mastodonte, Dinotherio, etc.

*Plioceno.* (De *Pleion*, más.) En estratigrafía, flora y fauna son una simple continuación de las anteriores con representantes de todos los tipos de Vertebrados, entre éstos los Rumiantes con cuernos, el Jabalí y los primeros Caballos y Elefantes.

### Paleogeografía

*Clima.* — La presencia de plantas tropicales y subtropicales en las regiones templadas y polares, respectivamente, así como la de sedimentos salíferos y coralinos en todas las latitudes, indican un clima más cálido y seco que en el Cretácico y aun que en nuestra época, para el Eoceno. A partir de esta serie, los corales se reducen cada vez más al área ecuatorial y la flora de ambiente benigno y crudo desciende a paralelos y altitudes más bajas, al paso que los vegetales, en general, presentan vigor y lozanía, por todo lo cual es de suponer un paulatino enfriamiento y un régimen más suave y húmedo al mismo tiempo.

Los árboles de hoja caduca certifican el juego definitivo de las estaciones climáticas, y las diferencias de flora y fauna, en relación con las zonas térmicas, señalan la existencia de regiones caracterizadas por el clima.

*Tierras y mares.* — Con la gran convulsión tectónica que abarca todo el Terciario, en las masas continentales mesozoicas se operan cambios profundos que alteran por completo el aspecto de nuestro planeta.

En el hemisferio Norte, el continente Chino-Siberiano se acrecienta con la anexión de la India, desgajada de las tierras australes; las cadenas alpinas enlazan y traban Eurasia y África, y entre sí varias regiones antes separadas por las aguas; una cuenca miocénica notable invade el zócalo nórdico del Atlántico, que aísla la América del Norte, mientras Groenlandia parece estar unida a Inglaterra pasando por Islandia hasta final del Plioceno.

En el hemisferio Sur, Australia y Madagascar adquieren independencia y las aguas eocénicas escinden América del Sur del continente Africano-Brasileño.

Los tres grandes océanos señalan ya los contornos ac-

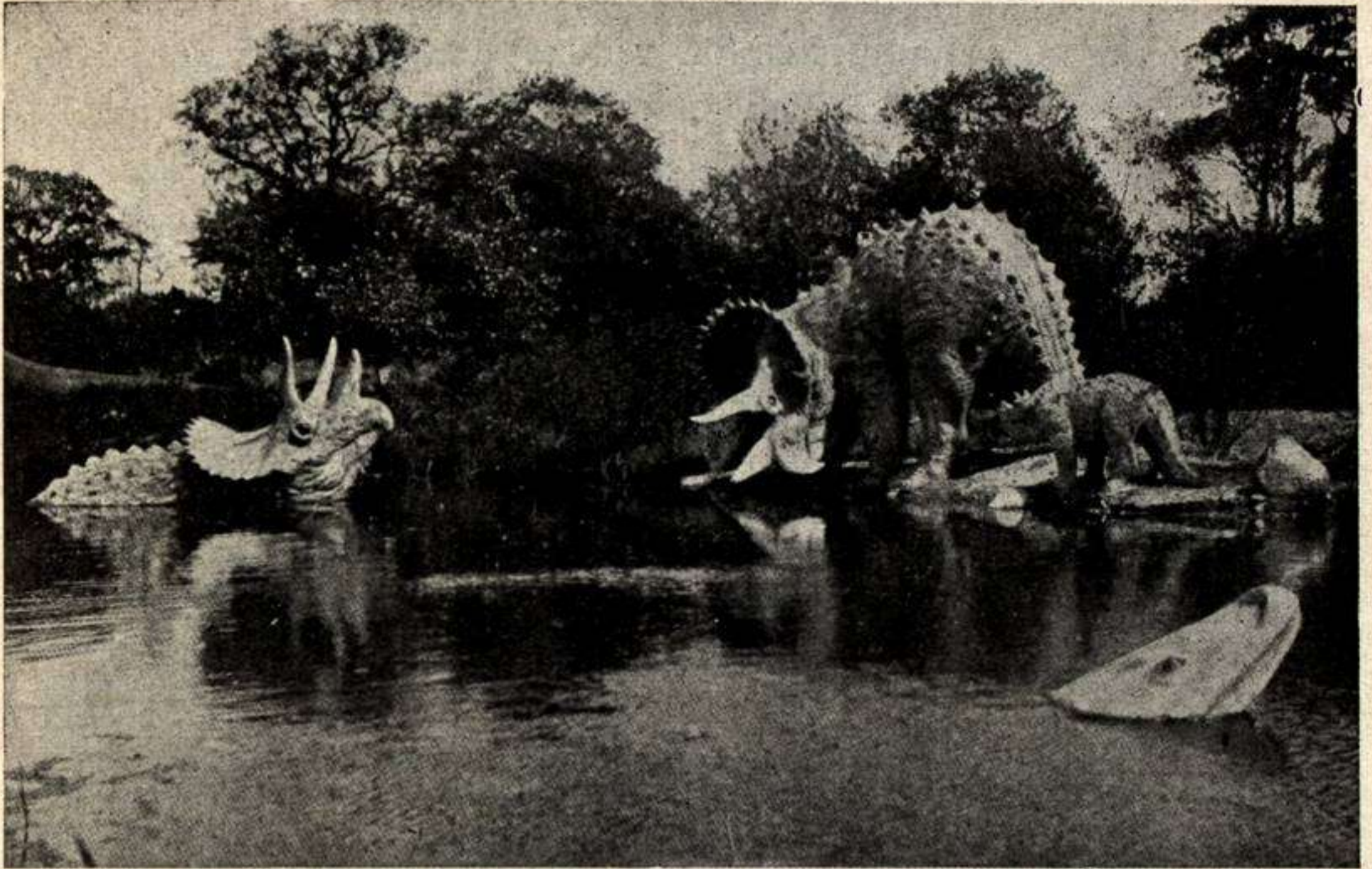


FIG. 1. — *Triceratops*, reptil secundario reconstruido en el Parque Hagenbeck, de Hamburgo.

(Historia Natural Gallach)

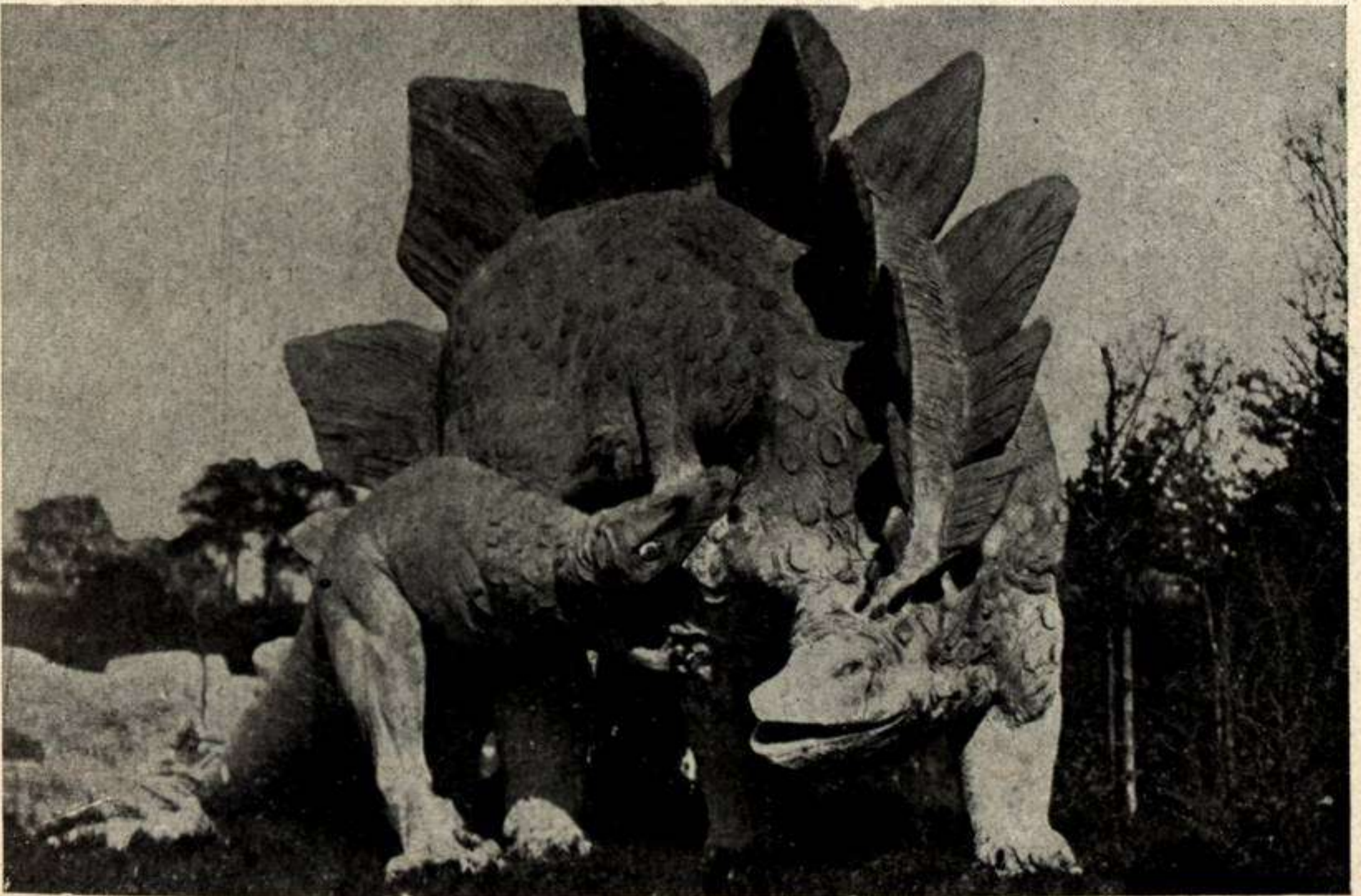


FIG. 2. — Magnífica reproducción en el Parque Hagenbeck, de Hamburgo, de una lucha entre un *Stegosaurus* y un *Ceratosaurus*.

(Historia Natural Gallach)

ERAS TERCIARIA Y CUATERNARIA

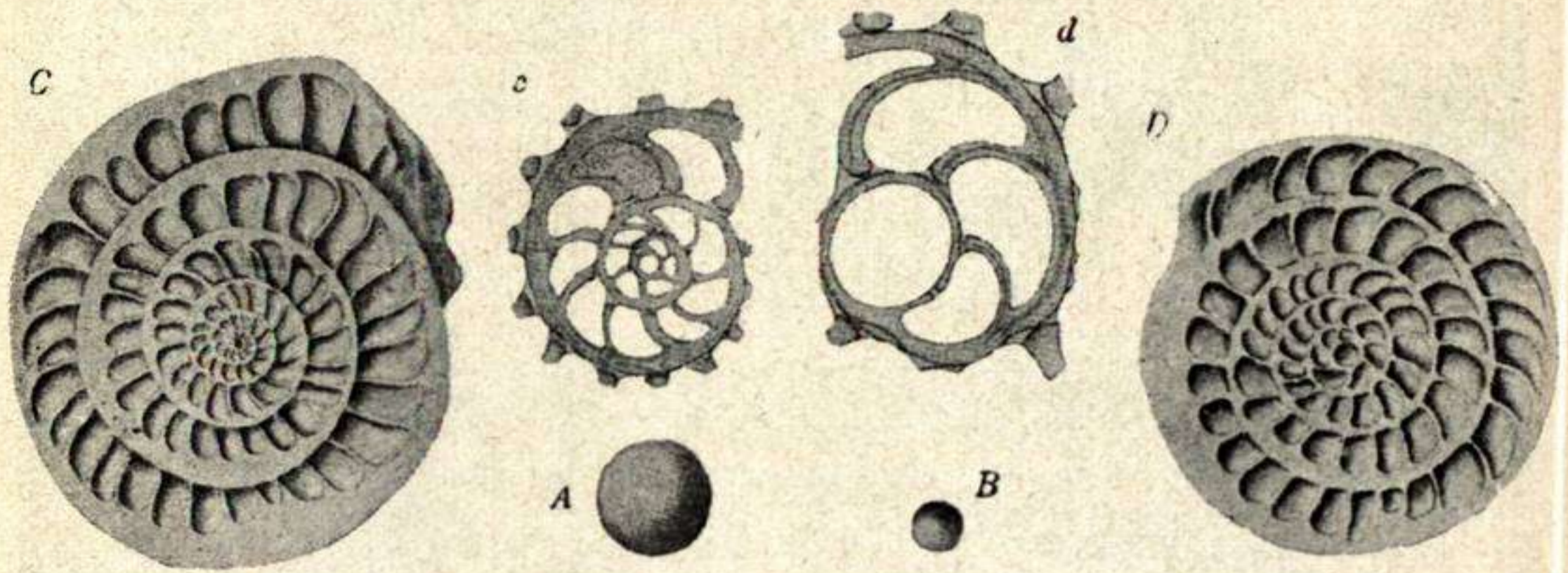


FIG. 1. — Diversas secciones de nummulites.

(De Dacqué)



FIG. 2. — Museo Botet, de Valencia, riquísimo en glyptodontes y otros mamíferos fósiles sudamericanos.

(Historia Natural Gallach)



tuales; el Tetys queda limitado a Oriente por las tierras asiáticas y a Occidente por la cadena Bética-Atlas.

El levantamiento de los enormes depósitos secundarios y los desgarros ocurridos, crean grandes fosas que en dirección meridiana se ciernen en el Mediterráneo y en los bordes del África oriental y el Sudoeste de Asia, así como las que ahondan el Pacífico. Mientras tanto, las antiguas cordilleras, y especialmente las alpinas, son objeto de un considerable trabajo erosivo que en algunos casos termina creando extensas peniplanicies y en otros acumula espesores enormes de detritos al pie de las montañas acabadas de formar. Con estos materiales de acarreo se rellenan depresiones y mares poco profundos. En los incidentes finales se hunde la cadena Bética-Atlas y se forma el estrecho de Gibraltar, que abre un nuevo paso entre el Mediterráneo y el Atlántico.

El relieve terrestre queda ya con los rasgos definitivos, si bien algunos retoques posteriores vendrán a confirmarlo con nuevos detalles parciales. Con todo, la Tierra ha entrado ya en su fase plenaria; falta únicamente, para completar el cuadro, que el hombre entre en escena.

## CAPÍTULO XIX

### ERA CUATERNARIA. EDAD DEL HOMBRE

El Cuaternario representa los tiempos modernos de nuestra historia geológica, en cuyos capítulos se registran los hechos más cercanos que ya entran en la esfera recordativa de la Humanidad y aun aquellos que tienen lugar ante nuestros ojos.

Se otorga al Cuaternario la categoría de Era o grupo independiente; pero algunos geólogos modernos entienden que tanto los caracteres estratigráficos como los paleontológicos no acusan una diferencia esencial del Terciario, por lo que le consideran como una simple continuación de este último.

Comprende dos períodos, *Pleistoceno* y *Holoceno*, llamados también *Diluvial* y *Aluvial*, y dos acontecimientos merecedores de ser estudiados: las glaciaciones periódicas y la comparecencia del hombre.

#### Caracteres litológicos

En los terrenos cuaternarios predominan por completo las facies continentales, tanto en extensión como en nutrida variedad de formas, ya que de las marinas y lacustres sólo son asequibles a nuestro estudio las litorales y neríticas, pues las fuerzas orogénicas no han sacado todavía a flote los sedimentos de mayor profundidad que los sondeos nos acreditan se están formando continuamente en el seno de las aguas.

Hay depósitos fluviales a base de conglomerados, gravas, arenas y barros; figuran muchos lacustres con arenas y travertinos; abundan los turbales y tobas calizas; no faltan los eólicos con sus dunas y las primeras formaciones loésicas, y por encima de todo descuellan los glaciares con sus depósitos morrénicos de diversas clases e interesantes sedimentos fluvioglaciares.

## Glaciaciones

El fenómeno geológico más interesante en el Cuaternario, no cabe duda que ha sido el de la glaciación. Ya anotamos cómo en el Plioceno se produce un enfriamiento del ambiente en las regiones nórdicas, el cual persiste con mayor intensidad en los tiempos posteriores, concretándose en densos y abundantes ríos de hielo que circulan y cubren las tierras europeas, asiáticas y americanas comprendidas entre el paralelo 50° N. y el polo boreal. Los Alpes, los Pirineos, Sierra Nevada, la Meseta Española, Escocia y otras montañas de la Europa meridional y central, también ostentaron grandiosas formaciones glaciares.

Las formas dominantes son las de tipo alpino en unos casos y las de tipo inlandeís en otros. Los productos y las figuras del relieve que se derivan de tales formaciones son análogos a los que se aprecian en nuestros días: morrenas, superficies pulimentadas y estriadas, valles en forma de *U* o artesa, complejos fluvioglaciares, circos y abundantes cubetas lacustres de excavación o barraje.

Las fases glaciares han sido por lo menos tres, bien desarrolladas, separadas por otras dos interglaciares; pero para muchos existe una cuarta fase de escaso desarrollo. Estas cuatro fases se denominan *Gunziense*, *Mindelense*, *Risense* y *Wurmiense*, nombres tomados de cuatro ríos alpinos de la vertiente septentrional en los cuales han sido claramente apreciados dichos fenómenos. La primera parece que fué la de menor enjundia; en la segunda los heleros alcanzaron el máximo esplendor, y las dos últimas tuvieron una amplitud más restringida.

Estas alternancias de la actividad glaciaria han tenido importancia decisiva en la configuración del relieve actual y en la constitución del paisaje cuaternario. Cada glaciación ha originado la formación de terrazas fluviales en los valles afectados por aquéllas y las emigraciones periódicas de la fauna y flora que hacían variar completamente el aspecto del país. Como se recordará (Capítulo X), la alternancia en el caudal de los ríos, producida primero por la glaciación y la fusión consiguiente más tarde, determinó la sucesión de periodos de escasa actividad erosiva, durante los cuales

se depositaron los aluviones en forma de terrazas, seguidos de otros dotados de gran poder de denudación durante los cuales los ríos excavaron un nuevo álveo cada vez más angosto y profundo. A este ritmo alterante de la sedimentación y la erosión se debe la forma escalonada de las vertientes propia de los valles cuaternarios.

¿Cuál ha sido la causa de la glaciación cuaternaria y de sus alternativas? He aquí un punto que a pesar de las teorías emitidas queda por esclarecer de una manera plenamente satisfactoria.

Hay quien pretende explicar la causa del enfriamiento en un descenso del poder calorífico de los rayos solares por variaciones importantes en los movimientos de la Tierra (Milankovitch), o por el paso del planeta terrestre por una nebulosa a consecuencia del movimiento traslático de todo el sistema solar a través del espacio (De Marchi); y no falta quien la busque en un cambio de posición de la atmósfera merced al aumento (Arrhenius) o disminución (Chamberlain) del anhídrido carbónico, con lo cual sería mayor o menor la cantidad de calor absorbida. Pero cada uno de estos hechos se habría realizado en las épocas anteriores al Cuaternario y, no obstante, no se produjo el fenómeno que estudiamos.

Para Chamberlain es evidente que después de cada una de las grandes crisis orogénicas ha surgido una crisis climática, sin duda por el aumento de las masas continentales emergidas y el promedio general de la altitud del relieve. Con esta elevación, las altas cumbres entran en contacto más íntimo con las nubes y determinan la precipitación y enfriamiento del vapor de agua en forma de nieve que se acumula en grandes mantos, cuyo peso gravita sobre la masa continental y la obliga a hundirse por isostasia, con lo que aumenta la temperatura y tiene lugar el deshielo. Libre ya del exceso de carga, la masa continental recobra su nivel primitivo; nueva precipitación con su séquito de glaciares, nuevo hundimiento con el deshielo consiguiente. Y así sucesivamente como un movimiento pendular, que resulta del carácter de almadía flotante que tienen los bloques continentales. Pero la amplitud de las oscilaciones pendulares disminuye con el tiempo, y en cam-

bio, en el glaciario, la segunda fase tuvo mucho mayor amplitud que la primera.

Finalmente, para Simroth, el desplazamiento periódico del eje de rotación de la Tierra habría producido una variación en la posición de los polos en el Primario, por lo que zonas actualmente tropicales se vieron sumidas en un clima frío; cuando el polo se aproximara a un continente, éste entraría en período glaciario mientras que a su retaguardia se produciría un período interglaciario; así los períodos glaciares no serían sincrónicos para toda la Tierra. Wegener recoge esta idea de Simroth y la generaliza para el Cuaternario, pero la alternancia en la posición de los polos la atribuye a desplazamientos de las masas continentales.

### Caracteres paleontológicos

Las formas biológicas pliocénicas se proyectan íntegras en los primeros tiempos cuaternarios, y con variaciones de poca importancia van adquiriendo todos los matices de la fauna y de la flora que se ofrecen a nuestra vista. No surgen nuevas clases ni familias; tan sólo algunos géneros o especies enriquecen la nutrida gama de la sistemática actual, y de ella han desaparecido unos pocos que figuraron en el Terciario y algunos de los nacidos en fecha más reciente. Pero el fenómeno más importante en este campo es el que corresponde a las periódicas emigraciones de plantas y animales con motivo de las alternativas glaciares.

Cuando los heleros se extienden por las tierras templadas de Europa, Asia y América, la flora y la fauna que les competen se ven impelidas a buscar refugio en la zona ecuatorial, siendo substituidas por las especies propias de los países fríos. El Mamut y el Rinoceronte, cuyo cuerpo se halla recubierto de lana por haberse adaptado ya al clima extremadamente crudo; el Reno, el Ciervo gigante; los animales de la tundra, como la Liebre de las Nieves y el Buey almizclero; el Bisonte, la Gamuza, el Oso de las cavernas, etc., invaden por completo las áreas centrales del hemisferio Norte y aun los bordes meridionales de Europa y Asia, como España e Italia. En el Mediterráneo aparecen los seres vivos de las tierras árticas en los depósitos litorales. La ve-

getación es entonces pobre y raquítica, la propia de la tundra y de la estepa asiáticas.

En los períodos interglaciares, tanto la fauna como la flora frías emigran hacia las altas esferas boreales o se guarecen en las montañas de mayor elevación, y los países templados se ven asistidos de numerosos Hipopótamos, Elefantes y Rinocerontes de piel desnuda, y de Monos y otros animales relegados hoy a la zona tropical. El Mediterráneo contempla cómo las especies actualmente senegalesas reemplazan a las anteriores y la vegetación retorna exuberante y atractiva con los ejemplares de magno desarrollo a expensas de un ambiente templado y húmedo.

Con todas estas andanzas desaparecen algunas especies, de lo que puede deducirse que a cada uno de los períodos glaciares e interglaciares les atañe una flora y una fauna propias.

Entre las especies extintas merecen citarse :

El *Elephas antiquus*, el *Elephas meridionalis* y el Mamut (*Elephas primigenius*) dotado de dos enormes defensas y con el cuerpo cubierto de lana.

El Ciervo gigante (*Cervus megaceros*), de cuernos en forma de pala, los cuales medían cerca de cuatro metros.

El Rinoceronte lanudo (*Rhinoceros tichorinus*), el *Hipopotamus major*; el Oso, la Hiena, el León de las cavernas.

También cabe incluir entre los desaparecidos los grandes Armadillos o Desdentados; el Megaterio (de enormes dimensiones, que se incorporaba sobre sus patas posteriores y su cola, y con largas uñas para la defensa en las extremidades anteriores), y el Gliptodonte, análogo al Armadillo, pero de tamaño muy superior. Estas dos últimas especies caracterizan la fauna de América del Sur, especialmente en la Patagonia (fig. 86).

*El hombre fósil.*—El acontecimiento biológico de mayor interés, es, sin duda, la aparición del hombre sobre la Tierra, acaecida en los últimos estadios del período glacial.

Los primeros restos fósiles corresponden a la mandíbula de Mauer, cerca de Heidelberg (*Homo heidelbergensis*), cuya dentición es netamente humana; siguenle varios cráneos y esqueletos de la raza de Neanderthal

(*Homo neandertalensis*), de caracteres mucho más cercanos al *Homo sapiens*, del final del glaciario, y representante fidedigno del hombre actual, aunque en variedad distinta, que constituyó la denominada *raza de Cro-Magnon*.

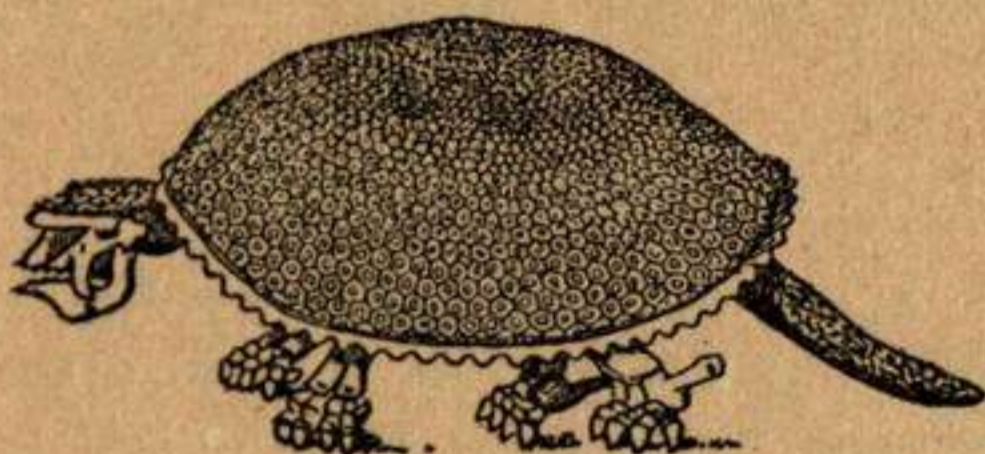


Fig. 86.—Glyptodonte, desdentado de la Era Cuaternaria (Colomb et Houlbert).

Sobre el momento preciso en que se produjo su presencia nada puede afirmarse en concreto; pero, tanto por los restos señalados como por las leyendas recogidas, es evidente que conoció el glaciario, cuando menos en sus últimas concreciones.

#### PERÍODOS CUATERNARIOS

*Pleistoceno*.—(De *pleistos*, el más.) Corresponde al período en que tienen lugar las diversas fases de la glaciación; los ríos, con el deshielo, llevan un caudal enorme y adquieren grandes amplitudes; se registran las formaciones de loes y la aparición del hombre. Denominase también *Período Glaciario*. Se divide en cuatro fases, que son: *Gunziense*, *Mindeliense*, *Risiense* y *Wurmiense*. El hombre aparece entre el *Risiense* y el *Wurmiense*.

*Holoceno*. — La flora, la fauna y el clima son como en la actualidad, con la que no existe solución de continuidad. Se forman los aluviones del cauce actual de los ríos, los sedimentos turbíferos y los volcanes de nuestra época.



## CAPÍTULO XX

### LA VIDA EN EL PASADO GEOLÓGICO

#### Concepto de la Paleobiología

Mediante la clasificación y ordenación adecuadas de los fósiles que encierran las formaciones sedimentarias, el geólogo se encuentra en condiciones de poder fijar la edad relativa de los estratos y de catalogar por orden cronológico las series estratigráficas que forman la corteza terrestre. Desde este punto de vista, los fósiles no son el objeto inmediato de la investigación, sino tan sólo el medio indirecto de que se vale el geólogo para precisar el orden de aparición de los sedimentos terrestres. Por razón de su finalidad, se designa a esta rama de la Geología con la denominación de *Paleontología estratigráfica*. Es el aspecto más conocido de la ciencia paleontológica, y el que durante mucho tiempo ha absorbido la atención de los investigadores.

Estos últimos años ha empezado a tomar carta de naturaleza otro aspecto de los estudios paleontológicos que, aunque siempre ha ido más o menos involucrado en las observaciones antiguas, modernamente ha tomado mayor impulso, hasta desgajarse de aquéllas para constituir una disciplina nueva que recibe el nombre de *Paleontología biológica* o *Paleobiología*. Su objeto es el estudio de la biología de los seres ancestrales, es decir, de las manifestaciones vitales propias de tales organismos, de las relaciones existentes con el medio ambiente en que se desarrollaron y de su evolución a través de los períodos geológicos.

Actualmente convergen y contribuyen al progreso de la Paleobiología una nutrida pléyade de sabios, procedentes tanto del campo biológico como del geológico, por lo cual dicha ciencia, de amplios horizontes, empieza a llegar a conclusiones interesantísimas, siendo, sin duda alguna, uno de los terrenos más abonados para futuras investigaciones.



Atendiendo a los distintos objetivos enunciados, comprende la Paleobiología las siguientes ramas:

A) La *Etología* (del griego *ethos*, género de vida), que se ocupa del estudio de la forma de los organismos fósiles en relación con el medio en que se desarrollaron y los antecedentes de sus progenitores.

B) La *Ecología* (del griego *oikos*, medio ambiente), que trata de reconstruir la configuración del mundo antiguo y de sus condiciones de vida con los datos aportados tanto por los fósiles mismos como por la naturaleza de los sedimentos.

C) La *Biogeografía*, que estudia la repartición geográfica de las formas fósiles en los diversos medios terrestres en relación con sus condiciones de existencia.

D) La *Filogenia* (del griego *filos*, línea, y *genos*, engendrar), que se refiere a la historia de la descendencia, y, en general, al progresivo desarrollo de la vida en el transcurso de los tiempos geológicos.

### Método de las investigaciones paleobiológicas

El método propio de la Biología consiste en la observación directa y experimental de las actividades vitales de los organismos. Pero este método es, por desdichado, absolutamente impracticable en los restos fósiles. Pues no tan sólo falta en ellos toda manifestación vital, sino que, ordinariamente, se trata nada más que de restos incompletos, ya que sólo llegan hasta nosotros las partes duras del organismo fosilizado, tales como la concha de los moluscos, el caparazón de los artrópodos o el esqueleto de los vertebrados. Además, estas partes fosilizadas no son casi siempre otra cosa que moldes exactamente iguales, pero moldes al fin y al cabo, de ciertos órganos en los cuales la materia orgánica y la íntima estructura celular han sido substituídas, molécula a molécula, por la materia mineral fosilizante: carbonato de cal, sílice, piritita, etc. Por eso ni tan sólo es posible deducir de la composición del molde la naturaleza química del órgano fosilizado. Así, por ejemplo, la concha de los ammonites y de los moluscos se presenta convertida, unas veces, en moldes calizos, y, otras, en moldes piritosos; la transformación depende únicamente del medio en que se ha operado la fosilización, rico en sales calizas, en el primer caso, o en

materias ferruginosas, en el segundo. Otro caso más engañoso todavía es el que ofrecen algunas esponjas calizas de las formaciones jurásicas, que al principio se creyó que pertenecían al grupo de las esponjas de esqueleto calcáreo, cuando en realidad se trata de esponjas silíceas (Sílico-esponjas) transformadas durante el proceso fosilizante.

Y aun no es ese el único escollo con que tropiezan las investigaciones paleobiológicas; pues si difícil resulta reconstruir el organismo, no es menos costoso restituir el fósil al medio en que se desarrolló. Éste ha desaparecido totalmente, y sólo por ciertos caracteres de los sedimentos es posible deducir algunas de sus características esenciales, tales como si se trata de un fósil terrestre, marino o de agua dulce; pero aun en este caso quedan por dilucidar la mayoría de las circunstancias del medio, temperatura, humedad, etc. Mas también este recurso suele fallar algunas veces, pues frecuentemente los restos fósiles se encuentran en sedimentos que acusan un medio distinto de aquel que realmente habitaron. Basta considerar que en las aguas marinas superficiales pululan infinidad de organismos que después de muertos entran a engrosar con sus restos la fauna propia de los fondos oceánicos, en la que figuran animales fijos en el suelo y otros que viven enterrados en el lodo o excavan sus habitaciones en las rocas. El ejemplo antes citado de los ammonites viene a ilustrar este hecho. Está demostrado que estos animales fueron nadadores activos y habitantes de las aguas superficiales, a pesar de lo cual se encuentran fosilizados junto con moluscos de los fondos oceánicos, corales y animales terrícolas. Asimismo, en las calizas litográficas de Franconia y en las del Montsec se encuentran juntos seres que vivieron en medios totalmente distintos: peces, estrellas de mar, crustáceos terrícolas, ranas, insectos terrestres y restos de plantas continentales (Cap. III).

Ante tales dificultades que plantea la investigación paleobiológica, se requiere un método riguroso que las allane y que elimine las múltiples causas de error que pudieran concluirse de la simple observación o de deducciones demasiado ligeras.

En primer lugar, es preciso fijar la posición sistemática de la forma fósil dentro de los grupos taxonó-

micos naturales o *filums* que distingue la Zoología o la Botánica. Es decir, catalogar el fósil en la clase, orden, familia y género que le corresponda. Eso es fácil cuando hay formas vivientes afines. Por ejemplo, en las capas mesozoicas y paleozoicas son frecuentes los animales llamados braquiópodos (Cap. XVI) caracterizados por sus conchas de valvas desiguales; la mayor forma un gancho, que recubre a la pequeña, en el que se observa un orificio o foramen bien desarrollado. La presencia de concha podría inducir a pensar que se trata de moluscos lamelibranquios; pero en la actualidad subsisten todavía algunos pocos representantes de los braquiópodos, los cuales, por su organización anatómica, forman un grupo zoológico completamente distinto de los moluscos.

Mayores son las dificultades que se presentan cuando se trata de grupos que sólo son conocidos en estado fósil, mucho más si se tiene en cuenta que pocas veces alcanzamos a conocer la organización de las partes blandas del ser. Por eso existen todavía grupos fósiles de posición incierta.

En segundo término, es lícito atribuir el mismo género de vida a los fósiles que a los animales actuales próximos a ellos y que poseen la misma forma general del cuerpo o de algunos de sus órganos adaptados a determinados medios de vida. Podríamos citar numerosos ejemplos, pero uno de los más demostrativos nos lo ofrecen los ammonites mesozoicos comparados con el género *Nautilus*, cefalópodo que vive actualmente en el océano Indico. La concha de este molusco, como la de los ammonites, aparece dividida en cámaras ocupadas por gases, circunstancia que le permite, aumentando o disminuyendo la masa gaseosa, ascender o descender en el seno de las aguas, aunque de ordinario el *Nautilus* descansa o se arrastra en los fondos marinos. Los ammonites que se encuentran en las capas de la Era Secundaria son de concha mucho más tenue y delgada que la de los *Nautilus* fósiles que contienen los sedimentos más antiguos. De esta diferencia de grosor se deduce que los ammonites eran de concha tenue y transparente y se movían libremente en las aguas, mientras que los *Nautilus* serían mucho más pesados y sólo ocasionalmente ganaban la superficie como los *Nautilus* actuales. Por otra parte, hay conchas de ammonites

con perfil transversal suavemente arqueado y groseramente decoradas por costillas, nudos, etc., mientras hay otras discoidales y aplastadas, de perfil agudo y de concha lisa. Estas últimas debieron de ser aptas para surcar velozmente las aguas marinas, mientras la configuración de las primeras ofrecía serias resistencias al movimiento, particularmente su amplio dorso, de posición delantera en el sentido de la progresión.

Es más difícil seguir estos razonamientos cuando no existen en la actualidad representantes vivientes. Entonces hay que recurrir a la forma del cuerpo o de órganos semejantes a los de animales actuales afines. Así, por ejemplo, no es posible deducir por comparación el género de vida de los trilobites (Cap. XVI), pues los cangrejos actuales, con los cuales tienen cierto parentesco, son de costumbres muy variadas, ora se arrastran perezosamente por el suelo, ora nadan velozmente en el agua, ora flotan en las aguas superficiales. Pero algunos ejemplares fósiles excepcionalmente bien conservados, permiten atribuir a cada segmento de los trilobites un par de extremidades articuladas, adecuadas para arrastrarse por el suelo, pero con el último artejo de cada pata convertido en peine natatorio. De esto se deduce que los trilobites eran animales que de ordinario vivían arrastrándose por el suelo, aunque podían remar y elevarse un poco por encima del mismo. Los miriápodos (ciempiés) actuales tienen un género de vida muy semejante. Todavía pueden deducirse algunas particularidades ecológicas de otros detalles anatómicos. Así, por ejemplo, hay trilobites provistos de ojos compuestos como los insectos, mientras que otros son ciegos, pero conservan los abultamientos oculares, lo cual quiere decir que aquéllos se han atrofiado. Si los órganos responden a la función, es evidente que los primeros vivirían en aguas iluminadas, mientras los segundos vivirían en la obscuridad. En el mar ésta puede ser producida por tratarse de profundidades superiores a 400-500 metros, donde ya no penetra la luz, o por vivir los animales hundidos en el suelo y entre las rocas. En el caso de los trilobites creyóse al principio que se trataba de la primera posibilidad; pero los sedimentos en que se encuentran estos fósiles no son de facies profunda, sino de aguas superficiales. Por consiguiente, los trilobites debieron de vivir

hundidos en el fango oceánico. Esto nos señala el tercer camino empleado en las investigaciones paleobiológicas: la naturaleza de los sedimentos.

Con todos estos antecedentes, es posible deducir las características del medio ambiente en que se desarrolló el organismo fosilizado, la función de sus órganos, y proceder a la reconstrucción anatómica del ser, del que solamente conocemos algunas partes esqueléticas.

Esto último es posible en virtud del llamado *principio de correlación*, que regula las relaciones anatómicas y funcionales entre las diversas partes de un organismo. En virtud de esa correlación orgánica, Cuvier, ante los ojos asombrados de sus incrédulos colegas, iba cincelando los huesos marsupiales, todavía escondidos en la masa pétrea incrustante, del esqueleto encontrado en las capas terciarias de Montmartre, y cuya dentición, puesta al descubierto, le permitió identificar la especie fósil con los marsupiales australianos actuales, poseedores, a su vez, de aquellos huesos pelvianos de que carecen los demás mamíferos.

### El medio ambiente y los organismos fósiles

Existen dos clases de semejanzas entre los seres de la Naturaleza. Unos muestran analogías en la estructura íntima de su organismo por pertenecer al mismo fílum, o a grupos biológicos estrechamente emparentados. Tales seres forman un grupo genealógico, cuyos términos están ligados entre sí por razones de descendencia. Las analogías que se descubren en la constitución del esqueleto de los distintos grupos de mamíferos, por ejemplo, pertenecen a este orden de semejanza filogenética.

Pero hay otro tipo de analogías que se presenta en animales de muy alejado parentesco y pertenecientes a grupos zoológicos heterogéneos, pero que viven en el mismo medio o que poseen géneros de vida parecidos. Entonces se dice de estos seres que están *adaptados* al medio, y se denomina *adaptación* al conjunto de relaciones existentes entre el medio y la forma de los organismos.

Pertenecen al mismo tipo biológico de adaptación las aves, los murciélagos y los reptiles voladores, los cuales, aunque tienen grados distintos de parentesco,

poseen ciertos caracteres comunes que, a manera de ropaje externo, determinan cierta uniformidad en la configuración del cuerpo, como la transformación de las extremidades superiores en alas adaptadas al vuelo.

El estudio de los tipos ideales de adaptación en consonancia con las condiciones mecánicas y fisiológicas de determinadas formas, es uno de los objetivos de la Paleobiología.

En los vertebrados podemos distinguir los siguientes tipos de adaptación.

A) *Nadadores*. El tipo ideal para el animal nadador es la forma de torpedo, lisa, y con el cuello fijo, con objeto de ofrecer menor resistencia al movimiento; las aletas sirven para la propulsión y orientación de la traslación. Muchos peces presentan este tipo ideal, así como los mamíferos adaptados a la vida acuática, delfines, ballenas, etc.

Según que la progresión se realice horizontalmente (*movimiento isobático*), hacia arriba (*movimiento hipobático*) o hacia abajo (*movimiento epibático*) la configuración de las aletas es distinta. En los reptiles nadadores de la Era Secundaria es posible deducir de la forma de la aleta sus costumbres de vida. A mediados de la Era, los *Icthyosaurus* poseen su cola terminal simétrica, con el lóbulo superior e inferior igualmente desarrollados, carácter propio de las formas isóbatas; mientras que los del comienzo de la Era son formas hipóbatas, con el lóbulo inferior de la aleta caudal mucho más desarrollado que el superior, diferencia que es la causa del movimiento ascendente del animal. Esto comprueba que los *Icthyosaurus* acuáticos proceden de formas adaptadas a la vida acuática, las cuales tenían que subir frecuentemente a la superficie de las aguas para dejar al descubierto sus fosas nasales y renovar las reservas aéreas de sus órganos respiratorios.

B) *Voladores*. La característica de los animales adaptados al vuelo es la presencia de alas, a la manera como se desarrollan en los peces, los reptiles voladores, las aves y los murciélagos. Dispositivos semejantes se observan en gran número de reptiles mesozoicos (*Pterodactylus*, *Rhamphocorynus*, etc.) y otros fósiles.

C) *Marchadores y reptantes*. Son tipos morfológicos desarrollados especialmente entre los vertebrados

terrestres. Se observan dos formas: los que al marchar se apoyan sobre la planta del pie, como el hombre (*plantígrados*), y los que se apoyan sobre las puntas de los dedos (*digitígrados*). En los primeros hay una marcada tendencia a la conservación del número de dedos, con lo que aumentan su base de sustentación, mientras en los segundos se reducen a uno (équidos) o dos (ruminantes).

También se observan formas características de adaptación en los invertebrados. Así distinguimos:

A) *Animales sedentarios*. Son los que viven en el suelo y realizan escasos desplazamientos. Las formas que se originan tienen por objeto proporcionar a los seres que practican ese género de vida una cierta estabilidad. Con este objeto suelen ser de amplia base o, si poseen conchas, se proveen de gruesas costillas y nudos que aumentan su peso.

B) *Animales fijos*. Son formas que representan un estado más avanzado en el proceso de fijación. Muchos adquieren forma cilíndrica (corales, rudístidos, etc.) o poseen pedúnculos fijadores.

C) *Animales marchadores*. Es el tipo que ofrecen la mayoría de los animales terrestres y los que viven sobre el suelo marino. Se originan formas muy diversas, pero en todas ellas es significativo el desarrollo de gran número de apéndices articulados adaptados a la marcha.

D) *Animales terrícolas*. Son los que viven en orificios excavados en las rocas o hundidos en el barro. Ordinariamente son ciegos y presentan atrofiados sus órganos locomotores (trilobites, moluscos, etc.).

E) *Animales flotadores*. Comprende las formas pelágicas y plantónicas, desprovistas ordinariamente de protección esquelética. Por eso escasean los fósiles de esta clase. En cambio, poseen órganos flotadores como la vejiga natatoria de los graptolites.

F) *Animales nadadores*. Figuran los trilobites, crustáceos, etc. En algunos, como los belemnites, se alcanza la forma de torpedo.

G) *Animales voladores*. Entre los invertebrados sólo figuran los insectos, los cuales empezaron a desarrollarse en los bosques del Carbonífero.

### Distribución geográfica de las especies fósiles

Es del dominio vulgar que las especies vivientes, vegetales o animales, no se esparcen por todos los lugares de la Tierra, sino que viven más o menos acantonadas en determinadas latitudes. Así, por ejemplo, los marsupiales (canguros) sólo se encuentran en Australia, los desdentados en América del Sur, los elefantes en Asia meridional y en Africa.

La Paleobiología no puede prescindir de la repartición geográfica actual de la fauna y de la flora, pues si se tiene en cuenta que desde el Cuaternario no han aparecido tipos fundamentales nuevos, la distribución geográfica de las especies vivientes debe coincidir en líneas generales con la del mundo terciario, por lo menos hasta que se producen los profundos trastornos que cambiaron, al principiar la Era, la configuración de la Tierra.

En la dispersión actual de los seres vivos señala la Biología tres factores principales, los mismos que han debido de ejercer su influencia durante todos los períodos geológicos. El *clima*, en primer lugar, es el que regula la dispersión de las especies hasta el límite de las regiones en donde reinan las condiciones más favorables para el desarrollo de cada especie. El cambio de clima comporta casi siempre un cambio floral y faunístico; véase a título de ejemplo las mutaciones biológicas que acompañan a las oscilaciones climáticas del Cuaternario. Otro factor fundamental en la repartición geográfica de las especies radica en la existencia o en la falta de *conexiones continentales*, pues aun cuando las condiciones climáticas óptimas se extiendan a áreas extensas, la dispersión sólo es posible en el caso que entre ellas existan puntos de contacto. En un tiempo, las migraciones faunísticas se explicaron por la presencia de estrechas bandas de tierra que pusieron en comunicación continentes que hoy aparecen aislados (*teoría de los puentes continentales*). Wegener, con su *teoría de las traslaciones continentales*, ha explicado satisfactoriamente, pero de manera distinta, muchas de esas pretendidas comunicaciones. Finalmente, la forma de desarrollarse el *proceso evolutivo de las especies* ha favorecido su expansión, unas veces, o la ha dificultado, otras.



Sean cuales fueren las circunstancias determinantes de la expansión geográfica de una especie, ésta se alcanza en virtud de un movimiento migratorio. Existen migraciones verdaderas, activas o pasivas, que consisten en la conquista de nuevos espacios por determinadas especies; así, aparece con la expansión, durante el Cuaternario, del molusco *Litorina*, que alcanzó las costas occidentales de América, mientras hoy vive acantonado en el mar del Norte. Pero, a veces, grupos iguales o muy próximos se presentan en territorios separados sin que jamás haya existido entre ellos comunicación alguna; en este caso se trata solamente de migraciones aparentes. Así, por ejemplo, durante el Pleistoceno, los Camélidos se encuentran en América del Sur, Africa y Asia, sin que en el momento de formación de esta familia haya existido comunicación transatlántica. La migración sólo pudo producirse, y de una manera muy difícil, a través de la América septentrional. En cambio, resulta más lógico admitir que ambos grupos de Camélidos, los del Nuevo y los del Viejo Mundo, proceden del desarrollo paralelo y simultáneo de un grupo ancestral, los Selenodontos, que se encontraba en ambas partes con mucho mayor anterioridad; la rama americana daría lugar al género *Llama*, y la africano-asiática al género *Camello*. Un caso parecido ocurre con los caballos terciarios, los cuales aparecen simultáneamente en Eurasia, América del Norte y América del Sur; también en este caso se trata de un desarrollo paralelo, o, lo que también se dice, una *convergencia*.

La distribución geográfica de las especies fósiles no se mantiene constante en el transcurso de los períodos geológicos. En general se manifiesta una tendencia progresiva a huir del polo; los seres vivos, lo mismo que los continentes, en su movimiento polarífugo wegeneriano, se acercan progresivamente a las bajas latitudes. Así, por ejemplo, los corales se extienden en el Silúrico hasta las regiones árticas; en el Carbonífero alcanzan solamente las costas irlandesas; en el período Cretácico se extienden sólo hasta los bordes del país alpino; su regresión prosigue durante el Terciario, y en el Mioceno llegan ya nada más que hasta las costas del Norte de Africa; actualmente su ecumen se extiende por las aguas cálidas del Pacífico y del Indico. Ejemplos pare-

cidos ofrecen los mamíferos y otros grupos animales. En el reino vegetal vemos cómo los árboles mediterráneos de hoja perenne alcanzan en el Terciario inferior las regiones árticas, y prosiguen durante el Terciario superior su marcha hacia el ecuador.

Este recorrido, que por su constancia tienen casi el valor de una ley universal, parece ser el preludio de la desaparición de los grupos que lo practican. La extinción de las especies no es casi nunca instantánea, sino que se realiza lentamente, siendo las zonas ecuatoriales el espacio últimamente ocupado. Por eso el océano Pacífico, que no es un mar joven como el Atlántico, sino que desde los comienzos de la historia geológica de la Tierra se ha extendido por aquellas latitudes, encierra un número enorme de grupos zoológicos casi extintos o próximos a extinguirse, verdaderos testimonios o *reliquias* del mundo ancestral. El género *Limulus*, artrópodo afín a los trilobites, aparece actualmente en las costas cálidas del Norte y Centro de América y en las costas occidentales de Asia; anteriormente, según atestiguan los fósiles mesozoicos, se extendía por Alemania, Siria, etc. Los Nummulites caracterizan universalmente el Terciario inferior, y en cambio hoy sólo aparecen en los mares de China y en el océano Índico. Las Trigonias y los Nautilus del Pacífico son también verdaderas reliquias testimoniales. Por eso puede decirse, con razón, del Pacífico que es un *mar reliquiario*.

La distribución geográfica de las especies fósiles, lo mismo que las vivientes, caracterizan determinados espacios de la Tierra, dando lugar a las llamadas provincias biogeográficas. Estas aparecen ya en el período Cámbrico, durante el cual se distingue una provincia nórdica (América del Norte y Norte de Europa) y un dominio pacífico, al cual pertenece la Península Ibérica. Los caracteres biológicos de cada provincia es el medio mejor para registrar los cambios de clima; por los caracteres de la fauna y de la flora se precisa la existencia de períodos glaciares (Cámbrico, Pérmico, Cretácico? y Cuaternario) y de períodos de clima uniforme y más templado (Silúrico, Carbonífero, Triásico, Jurásico y Terciario), durante los cuales la vegetación alcanza latitudes polares.

### Evolución de las especies

Hemos visto que el cuadro biológico de la Tierra cambia constantemente a través de los períodos geológicos. Los seres ancestrales son completamente distintos de los que hoy día pueblan las tierras y los mares, pero éstos sólo pueden proceder de aquéllos o de otros antepasados comunes. ¿Cómo se ha realizado esta transformación, o por decirlo mejor, con la palabra que ha hecho fortuna, esta *evolución*? ¿Ha sido una marcha progresiva, lenta y continua, apenas perceptible, o se ha verificado, por el contrario, a saltos? ¿Han existido, como pretende Cuvier, sucesivas creaciones ocurridas después de cataclismos aniquilantes? ¿Arrancan todas las formas actuales o los distintos grupos taxonómicos de un solo tronco o de varios? La marcha evolutiva, ¿obedece a cambios en el género de vida, es decir, a un proceso de adaptación al medio, o, por el contrario, a un imperativo orgánico más o menos desconocido? ¿Autoriza, por lo tanto, la Paleontología para discernir el valor atribuible a las interpretaciones filosófico-biológicas que explican de una manera mecanicista u orgánicovitalista el desarrollo de la vida?

He aquí algunos de los problemas biológicos más interesantes, cuya aclaración sólo puede encontrarse ahondando con bien templada reja en el campo casi virgen de la Paleobiología. Sin embargo, es conveniente no perder de vista el objetivo y las posibilidades de las investigaciones paleobiológicas, en cuanto a este aspecto se refiere. Su finalidad no es resolver los problemas estrictamente biológicos de la descendencia, sino aportar a las teorías de la evolución los datos que puedan extraerse de los conocimientos paleontológicos y que constituyen la premisa indispensable en que deben apoyarse aquéllas.

La teoría de la evolución explica cómo las diversas especies de animales y plantas se han originado las unas de las otras por sucesivos cambios y transformaciones. Esta teoría se basa en el hecho fundamental de que los seres más diversos de la Naturaleza pueden agruparse en series naturales o *filums*, entre los cuales existen tránsitos graduales insensibles, según una rigurosa ordenación jerárquica que empieza en los seres

unicelulares más sencillos y termina en los de mayor complicación orgánica.

Otros hechos no menos importantes sirven de base a la teoría evolucionista, entre ellos la llamada *Ley biogenética* de Haeckel, que establece el paralelismo entre la ontogenia y la filogenia. Según este principio, todo ser, desde que sale del huevo hasta su transformación en adulto, pasa por una serie de estados embrionarios que reproducen en forma resumida y seriada las fases evolutivas por que han pasado sus ancestrales. Así, por ejemplo, las aves actuales carecen de dientes, mientras que las primitivas, como el *Archaeopteryx*, poseían dientes en el pico; durante el desarrollo embrional de algunas aves, avestruces, papagayos, etc., aparecen los dientes, sin cumplir misión alguna, tal como los poseían sus progenitores. Rasgos análogos se observan en la mayoría de los estados embrionales de los seres vivientes.

En el campo biológico no es posible seguir más adelante en la investigación; el biólogo se detiene y se pierde entre la enmarañada urdimbre de hipótesis y conjeturas sobre cuáles pueden haber sido las fases de desarrollo predecesoras de las actuales; le está vedado comprobar la exactitud de su teoría. Corresponde, en cambio, a la Paleontología valorizar y convertir en realidad las suposiciones formuladas por los biólogos; y no sólo dar fe de su veracidad, sino concretar la forma en que se ha efectuado, pues si la evolución es cierta, debemos encontrar impresas las huellas de sus pasos en las formaciones sedimentarias de la Tierra.

La primera conclusión que se deduce de una mirada retrospectiva al conjunto de los seres ancestrales, y que habla en favor de la hipótesis evolucionista, es que los grupos taxonómicos inferiores son los primeros en aparecer. En efecto, tanto los vertebrados como los invertebrados se desarrollan a partir de los tipos más sencillos. De los primeros períodos de la Era Primaria sólo se conocen los crustáceos y otros animales inferiores; los primeros vertebrados, los peces, no aparecen hasta el Silúrico; después, en el Carbonífero, siguen los anfibios, y más tarde, al finalizar la Era, aparecen los reptiles; los mamíferos más sencillos aparecen al comenzar la Era Secundaria, pero no alcanzan su pleno desarrollo hasta el Terciario.

Los primeros estadios evolutivos, pues, están representados por formas inferiores y en número escaso; por eso el problema capital del origen de la vida requiere el examen riguroso de los primeros restos fósiles que se encuentran entre los estratos más antiguos de la Tierra.

*Los organismos primitivos.* — Es un error bastante difundido el creer que los organismos que se encuentran en las hiladas más antiguas poseen escasa diferenciación anatómica y tienen un sello tal de primitivismo que dejan entrever un origen no lejano de la vida, un tránsito gradual insensible de lo orgánico a lo inorgánico.

Los organismos cambrianos, trilobites, braquiópodos, etcétera, son de complicación anatómica tan compleja y tan adaptados específicamente al medio como la mayoría de los seres de los tiempos geológicos futuros. Es, pues, preciso ir más allá de los tiempos cámbricos para buscar el origen de la vida. Los restos orgánicos que se encuentran en las formaciones arcaicas son huellas enigmáticas o núcleos carbonosos de difícil interpretación, señalándose como los más diferenciados a pequeños radiolarios descubiertos en Bretaña. ¿Cuáles son las causas de tan escasa representación de la vida en el arcaico y de su brusco desarrollo al comienzo de la Era Primaria?

El metamorfismo sufrido por las formaciones sedimentarias más antiguas no puede ser el único responsable, ya que aquél no afecta siempre al complejo algonquino, y, además, sabemos que muchas series cámbricas metamorfoseadas han suministrado algunos fósiles. Por otra parte, las antracitas y los mármoles precámbricos señalan la presencia de sedimentos de origen orgánico, procedentes de vegetales los primeros, y de animales marinos calizos los segundos, pues el carbonato cálcico sólo se segrega del mar, por lo menos en grandes masas, por intermedio de tales organismos.

Hay quien opina que la causa de la ausencia de organismos fósiles en las formaciones primitivas se debe a la falta de órganos duros de protección, conchas, exoesqueleto, etc., que son ordinariamente los únicos restos que llegan hasta nosotros. Los que así opinan, apoyan su hipótesis en que el revestimiento conchiforme de moluscos, braquiópodos, corales, etc. se puede con-

siderar como una señal de adaptación defensiva contra las influencias enemigas, oleaje, otros animales, etc. Los seres que adquieren este revestimiento protector se transforman precisamente en sedentarios perezosos, por lo que pronto degeneran y pierden sus órganos locomotores. Por lo tanto, no es aventurado suponer que los animales provistos de concha proceden de formas originarias desnudas y no degeneradas. He aquí, pues, la causa de la pérdida de todo vestigio de tales organismos primitivos. Pero la argumentación no deja de tener sus puntos flacos; siendo los enemigos externos, mecánicos y químicos, de los organismos iguales a los actuales, ¿por qué los seres primitivos carecieron de aquellos elementos de defensa? ¿No parecen hablar en el mismo sentido las formaciones calizas que encierran los estratos metamórficos arcaicos?

Existe otra hipótesis que soslaya tales dificultades. Si es poco probable que la ausencia de órganos de protección o que la transformación metamórfica haya podido borrar completamente todo vestigio vital en los sedimentos marinos, ¿por qué no suponer que el origen radica en el continente y no en el mar? Si la aparición de organismos vivos está ligada a la presencia de sustancias coloidales, tanto mejor las cuencas continentales húmedas o lacustres debieron de ofrecer un medio más a propósito para la agregación de la materia coloidal que el mar con sus bajas temperaturas y sus condiciones uniformes. Si aceptamos que los seres vivos se desarrollaron primero en las aguas continentales, tomarían posesión del mar al principiar el período Cámbrico o un poco antes. Viene en apoyo de esta teoría el hecho de que las formas algonquinas, citadas anteriormente, son de agua dulce.

Si la argumentación no es suficientemente demostrativa, es por lo menos evidente que las mismas razones existen para pensar en un primer origen en el mar que en el agua dulce.

*Aparición y desaparición de las especies.*—Las especies fósiles no poseen todas la misma longevidad estratigráfica. Unas se extinguen poco después de su aparición, o evolucionan rapidísimamente, los graptolites, por ejemplo, mientras otras permanecen casi invariables desde los tiempos más remotos de la historia de la Tierra, tales como las *Lingulas* cámbricas, casi idénticas.

ticas a los braquiópodos del mismo género vivientes en la actualidad.

Para dar el significado biológico debido a la aparición o desaparición de las especies, conviene precisar mejor estos conceptos. Según Barrande, la aparición de una especie en los horizontes geológicos puede producirse de cuatro maneras.

A) *Por propagación*, cuando una especie pasa sin sufrir transformación alguna de uno a otro horizonte geológico. Para que la propagación, es decir, la continuidad de una especie en sentido vertical, sea posible, se requiere que la forma no esté específicamente demasiado adaptada al medio, pues de lo contrario toda modificación esencial de las condiciones de vida acarrearía por su cambio brusco la extinción de la especie; solamente los individuos poco adaptados son capaces de amoldarse a futuras contingencias.

B) *Por filiación*, cuando una especie se origina por transformación de otra anterior existente en el mismo sitio. Las teorías evolucionistas filosófico-biológicas, pretenden explicar el mecanismo de la filiación. En lo que se refiere a la Paleontología, este aspecto será estudiado más adelante.

C) *Por migración*, cuando la especie, en virtud de su dispersión horizontal, alcanza nuevos espacios ecuménicos. Los problemas paleobiológicos que plantean las migraciones fueron tratados al estudiar la repartición geográfica de las especies.

D) *Por novación*, cuando la aparición de la especie no responde a ninguno de los tres procedimientos anteriores. La novación puede alcanzarse por el paso de los organismos de un medio inadecuado a la fosilización a otro capaz de conservar las especies que hasta aquel momento pasaron desapercibidas. Novación no quiere decir, pues, forzosamente, aparición biológica repentina de una especie, sino que se refiere tan sólo a su aparición estratigráfica. Sin embargo, los biólogos han estudiado el caso de formación brusca, explosiva, de especies, fenómeno que designan con el nombre de *mutación*.

El cuadro biológico de los distintos períodos históricos de la Tierra cambia continuamente, no sólo por aparición de formas nuevas, sino también por la aparición de grupos sistemáticos enteros. La desaparición

estratigráfica de las especies puede ocurrir de tres modos:

A). Por simple extinción, sin descendencia.

B). Por migración a territorios invadidos actualmente por el mar.

C). Por transformación de la especie.

Solamente en este último caso ofrece su desaparición interés filogenético. Por eso conviene ser precavidos al calificar de extinguida local o universalmente una especie determinada.

En resumen, el análisis de la forma en que aparecen y desaparecen las especies en las formaciones sedimentarias nos lleva a la conclusión que, en determinados momentos, de acuerdo con la hipótesis evolucionista, las formas biológicas sufren una transformación más o menos profunda.

*El hecho de la evolución.* — Si se compara el desarrollo histórico estratigráfico de las formas que ofrece la Paleontología con los grupos que distingue la sistemática biológica, se ve que el orden cronológico de aparición de los seres vivos en el transcurso de los períodos geológicos es paralelo a la sucesión de grupos taxonómicos tal como los presenta ordenados la clasificación estratigráfica. Jamás en la historia de la Tierra aparece un grupo biológico antes que lo hagan los que, en la clasificación natural, se consideran como sus inmediatos inferiores. Antes de que aparezcan los mamíferos comparecen las aves, y antes de éstas, los reptiles, los anfibios y los peces, en el mismo orden jerárquico establecido por la Biología. El desarrollo histórico-geológico de la vida, consiste, pues, en una evolución orgánica progresiva, desde las formas simples a las más complejas que figuran en la cima de las series animal y vegetal.

La evolución de los distintos grupos biológicos no se realiza uniformemente a través del tiempo, sino mejor a saltos; mientras hay grupos y especies que apenas han sufrido transformación alguna desde los albores de la historia de la Tierra, o desde el momento de su aparición, como, por ejemplo, los Nautilus y los braquiópodos del género *Lingula*, otros, por el contrario, se transforman rapidísimamente y su longevidad sólo alcanza unos pocos períodos geológicos; son los fósiles característicos que utiliza el geólogo para determinar la edad de los estratos; cumplen estos caracteres los



graptolites, los ammonites, los reptiles, etc. Algunos, después de un período de máxima difusión y rápido desarrollo, quedan reducidos a un número escaso de especies que permanecen inalterables a través de los períodos sucesivos; así, vemos a los nummulites que sufren un desarrollo tan rápido en la primera mitad de la Era Terciaria, que sus especies sirven para caracterizar los distintos pisos del Eogeno; los únicos subsistentes de este grupo viven como reliquias en el océano Índico y han permanecido invariables desde entonces.

La comparación de la escala estratigráfica con estos períodos de transformación, nos indica que los cambios biológicos son paralelos a los cambios de medio que suelen señalar el comienzo de un período geológico. Por eso la cronología estratigráfica no se basa únicamente en hechos geodinámicos, sino también en caracteres paleontológicos específicos. Además se observa que en cada uno de los principales períodos geológicos predomina un tipo orgánico determinado. Esto resulta particularmente evidente para los vertebrados. Así, la Era Primaria es el momento de predominio del tipo anfibio; al final del Paleozoico aparecen los primeros reptiles; pero como se presentan todavía en el «período de los anfibios», la forma de aquellos reptiles recuerda aún al anfibio del género *Molcha*. Lo mismo sucede con el desarrollo de los mamíferos; al principiar la Era Terciaria, la mayoría de los vertebrados superiores pierden el carácter reptiloide del Mesozoico, para tomar el que tienen en la actualidad. En los invertebrados observamos ejemplos parecidos; por ejemplo, la forma de la concha en los moluscos.

Tanto como el proceso evolutivo de las formas de un mismo grupo sistemático interesa a la Filogenia investigar las relaciones genéticas entre troncos diferentes y encontrar, si es posible, el término de enlace entre ellos; estos elementos de unión o de tránsito entre grupos afines deben ser, según el postulado de la teoría, *formas neutras*, de caracteres comunes a varias ramas, situadas en la bifurcación de los principales grupos taxonómicos. Desgraciadamente, la historia paleontológico-estratigráfica nos indica que la diferenciación de los reinos animal y vegetal en tipos fundamentales se ha verificado tan pronto y con tanta rapidez, que los distintos grupos se desarrollan separadamente unos de

otros; las analogías entre grupos próximos se deben, más que a relaciones de descendencia según líneas genealógicas, al paralelismo en el desarrollo verificado bajo condiciones semejantes; ejemplo, el caso ya citado de los caballos terciarios.

En cuanto a lo que se refiere a las llamadas formas neutras, suele citarse como ejemplo típico el ave primitiva *Archaeopteryx*, forma que representa, al decir de los evolucionistas incondicionales, el término de tránsito entre aves y reptiles. El rigorismo científico obliga a declarar que hasta ahora no se han encontrado estas pretendidas formas neutras en la base de los grandes grupos biológicos. Además, según muchos paleontólogos, estas formas accidentales pueden muy bien interpretarse como terminaciones ciegas o formas aberrantes de ciertas series filogenéticas; según ese criterio, verosímil, ni los *Archaeopteryx*, ni los reptiles teromorfos de caracteres próximos a los mamíferos, ni los peces anfibioides, son eslabones intermedios de la cadena, sino extremos de series evolutivas aberrantes y sin descendencia.

Ante tales hechos acusados por la Paleontología, resulta difícil suponer que los tipos fundamentales del reino animal puedan proceder de seres hipotéticos distintos de los que encierran las formaciones sedimentarias. En los primeros tiempos de la teoría de la evolución, se conocía tan escaso número de fósiles, que se creía que hallazgos posteriores vendrían en su ayuda, con la aparición de formas de tránsito y de especies intermediarias que pudiesen convertir en series filogenéticas cerradas las formas aisladas hasta entonces conocidas. Pero como, en contra de lo supuesto, resulta que las formas neutras o de tránsito son tan sólo accidentales, si se quiere reconstruir el árbol genealógico del desarrollo de los seres vivos, es preciso hacerlo casi exclusivamente con los restos que conocemos.

El método empleado en la reconstrucción de las series genealógicas se basa en la suposición de que las formas recientes descienden de otras más antiguas, en las que se observan algunos rasgos anatómicos que permite interpretarlas como representantes primitivos de formas aparecidas posteriormente. Considerando a unos como descendientes de los otros, no es difícil encontrar formas con rasgos morfológicos intermedios con las cuales

pueda cerrarse la serie filogenética. Así se han construido hasta ahora la mayor parte de los troncos genealógicos de géneros y familias. Pero a medida que los hallazgos paleontológicos permiten conocer mejor los puntos de unión entre las formas aisladas, se llega a un resultado absolutamente contradictorio, pues la mayoría de las series filogenéticas de los troncos principales, tenidas como probables, se deshacen en líneas paralelas, sin que forzosamente unas desciendan de otras. De eso se deduce la falsedad del método seguido en la restitución de la mayor parte de los árboles genealógicos.

Por otra parte, el estudio de las formas fósiles señala que los caracteres nuevos que aparecen en los organismos, no lo hacen según una línea unificada por tránsitos imperceptibles, sino a sacudidas o saltos bruscos. En esto se llega a una coincidencia notable con la Biología, pues ésta admite que las formas nuevas se forman precisamente por transformaciones súbitas, con carácter explosivo (*mutación*). Las series paleontológicas unidas por tránsitos graduales de algunos órganos, no son casi nunca series filogenéticas, sino que se deben a procesos de adaptación de ramas genealógicas distintas, es decir, se trata de un desarrollo paralelo.

Éstas son las conclusiones que se deducen, en cuanto a la evolución de las especies se refiere, del estudio de los organismos fósiles. Los resultados obtenidos están en contradicción con la hipótesis evolucionista en su acepción primitiva. Caen, por falta de pruebas, aquellos fantasmagóricos árboles genealógicos desarrollados a partir de seres primitivos, el *protobios* de Haeckel. A medida que nuevos hallazgos permiten conocer mejor las relaciones entre los seres dotados de vida, se perfila el proceso de la evolución de manera muy distinta de como se imaginó en los tiempos de Darwin y de Lamarck.

Busquemos ahora una interpretación plausible a estas nuevas orientaciones.

*Adaptación y descendencia.* — Si todos los biólogos están de acuerdo en aceptar como indiscutible el hecho de la evolución, existe, en cambio, diversidad de criterios en cuanto a la causa eficiente de la transformación.

Según Lamarck y los neolamarckistas, la causa radica

en la necesidad de adaptarse al medio para poder sobrevivir. Darwin y los neodarwinistas opinan, en cambio, que las relaciones existentes entre el medio y la configuración de los organismos no guarda la relación de causa a efecto, sino que se produce indirectamente por selección natural y supervivencia de las formas que presentan rasgos estructurales mejor adaptados a la lucha por la existencia. Sea causa real o aparente, lo cierto es que los seres vivos y el medio ambiente aparecen estrechamente ligados.

Ahora bien; para que un carácter adquirido por adaptación tenga valor evolutivo, es preciso que se pueda transmitir de padres a hijos. Por eso la teoría de la evolución descansa sobre las leyes que regulan la herencia. Veamos las enseñanzas que, respecto a esta cuestión, nos proporcionan las formas fósiles.

La Biología nos enseña que existen dos clases de herencia, una real y otra aparente. Se denomina *real* cuando un organismo que ha adquirido por adaptación determinado carácter, lo sigue retransmitiendo a sus descendientes, aun cuando sea cambiado de medio. La herencia es *aparente* cuando un carácter, adquirido por adaptación al medio, deja de transmitirse hereditariamente al abandonarlo. En el primer caso, el carácter adquirido ha entrado a formar parte de la masa hereditaria y se dice que forma parte del *genotipo*, o que es *genotípico*, mientras que en el segundo el carácter se adquiere temporalmente en tanto duran unas determinadas condiciones, ante las cuales el organismo sólo reacciona exteriormente; por eso se le llama *fenotipo*, y *fenotípico* al carácter adquirido transitoriamente.

Lógicamente, en las capas geológicas solamente aparecen los fenotipos, los cuales, como acabamos de ver, pueden coincidir o no con el genotipo, que es el que lleva los caracteres de verdadero valor en la herencia y, por tanto, en la evolución. Por eso resulta que la evolución que podemos observar en las formas fósiles es la fenotípica o aparente, y no la genotípica o verdadera. Esta, según el postulado evolucionista, debe transformarse en virtud de un lento proceso gradual; aquélla, por el contrario, se realiza a saltos y de una manera discontinua.

Parece ser que nada sería tan fácil al biólogo como investigar si un carácter hereditario es fenotípico o

genotípico. Bastaría, al parecer, someterle a un cambio de medio. Pero no puede olvidarse que juzgamos las cosas aparentemente, ya que un carácter adquirido puede ser genotípico y quedar oculto potencialmente durante cierto tiempo (*Latencia*). En cambio, el geólogo, con la seguridad que le prestan las múltiples transformaciones del medio sufridas por los seres vivos y el tiempo transcurrido, puede juzgar si un carácter se ha conservado hereditariamente o no en el transcurso de los períodos geológicos. La investigación estratigráfica más rigurosa señala, como dijimos, que las series unidas por términos de tránsito insensibles son series fenotípicas, pero no verdaderas series genealógicas, en las que unos seres proceden de otros. Con eso, vuelve a la memoria el repetido ejemplo de los caballos terciarios.

La Paleontología demuestra, si el biólogo quiere aprovechar sus enseñanzas, que debemos distinguir tres tipos de series evolutivas:

A) *Series filogenéticas o genealógicas*, formadas por individuos que descienden unos de otros y se suceden por lo tanto cronológicamente, por orden riguroso, en la escala estratigráfica.

Esas series no han podido ser establecidas por ningún paleontólogo.

B) *Series de adaptación*, cuando, en virtud de un fenómeno de convergencia, diversas ramas dan lugar a un tipo orgánico común, adaptado específicamente al medio. Hemos visto numerosos ejemplos.

C) *Series ortogenéticas*, formadas por individuos en los que, sin que desciendan forzosamente unos de otros, se observa la evolución de algunos de sus órganos en una línea unificada; de tal suerte, que si nos fiáramos sólo de aquel carácter, creeríamos que se trataba de

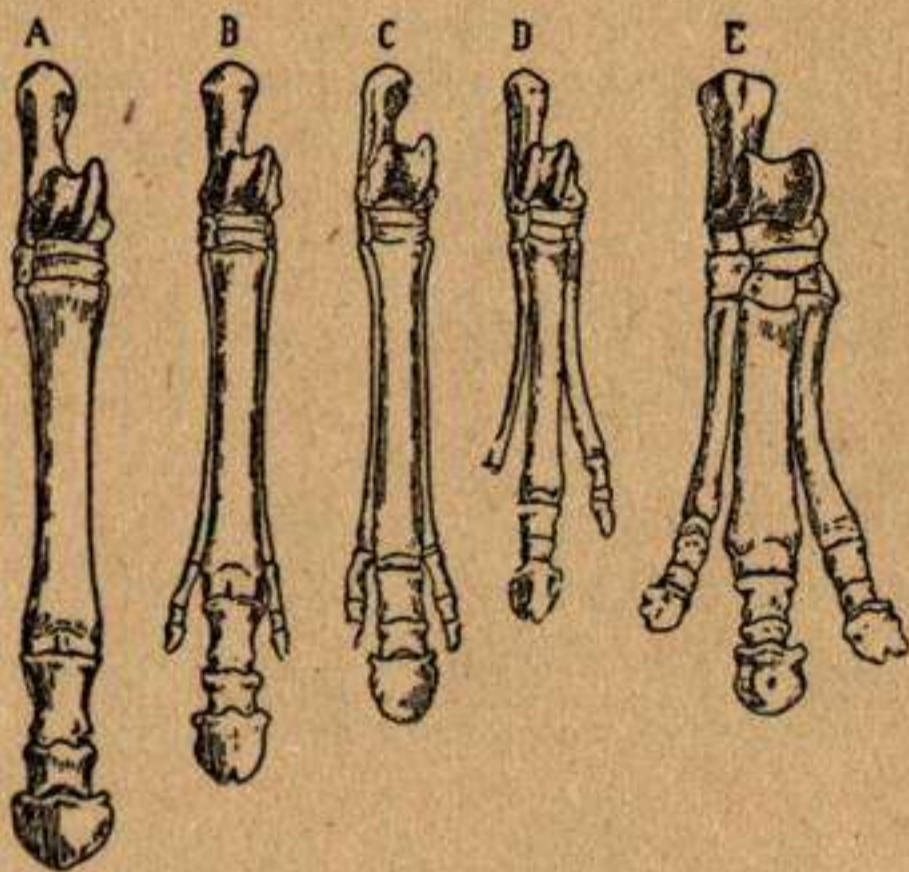


Fig. 87. — Serie evolutiva ortogenética de las extremidades en los Équidos terciarios.

una serie filogenética. Son ejemplos las tan repetidas series evolutivas de los caballos, rumiantes, etc. En cambio, si observamos en estos mismos seres la evolución de otros órganos, tendríamos por progenitores a los que anteriormente hemos considerado como descendientes. Esta evolución orientada en un sentido determinado (reducción del número de dedos de las extremidades, evolución del dentado, etc.), recibe el nombre de *ortogénesis*. Un atributo fundamental de la evolución ortogenética es la *irreversibilidad*. La modificación progresiva de un órgano determinado se realiza constantemente en el mismo sentido en que se ha iniciado; en ningún caso puede verificarse en sentido inverso. Por eso puede afirmarse que el cuadro biológico de cualquier período de la Tierra jamás volverá a repetirse.

Tales relaciones seriadas son las únicas que pueden aclarar los verdaderos troncos filogenéticos que busca el biólogo y que constituyen el fin primordial de la Paleobiología.

## APÉNDICE

### SÍNTESIS GEOLÓGICA DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

*Constitución de la Península Ibérica.* Si un atributo común puede engarzar la gama del paisaje hispano es el de la diversidad, como quizá no pueda ofrecerla ningún otro país de Europa; esa diversidad que tan honda y a veces tan convulsivamente repercute en el alma nacional.

A las recortadas cresterías y a los glaciares de las cimas pirenaicas, flanqueadas por prados verdeantes y hondos valles surcados por ríos de espuma, puede oponerse el paisaje árido y sediento, quemado por un sol africano, de las estepas murcianas y aragonesas. El viejo macizo galaico de formas redondeadas y lomas suaves o las peniplanicies extremeñas arrasadas por la erosión multiseccular, contrastan vivamente con las briosas formas de los cantiles calizos de los Picos de Europa o de las serranías béticas y levantinas. Al sol brillante y al cielo nítido del Mediterráneo se enfrentan la bruma casi perenne y la humedad norteñas; a las formas angulosas y descarnadas de Levante, la curva suave del relieve atlántico protegido por tupidas landas y arbolado. A la sucesión brusca y repentina de montañas escarpadas y hondas depresiones que alternan en la periferia plegada, la monotonía enervante de los trigales de la meseta castellana, infinita.

La variedad y la distribución del roquedo en el ámbito peninsular son las principales causantes de estos contrastes paisajísticos. Las formas que se observan en los terrenos margosos y arcillosos de blanda consistencia, fácilmente arroyados, tienen escasa bizarria y en nada se parecen a los paredones y formas abruptas y descarnadas que ofrecen las serranías calizas o los dorsos suavemente ondulados y cubiertos por lozana vegetación de los viejos macizos graníticos y

pizarreños. He aquí una división paisajística de indudable valor geológico y geográfico que el roquedo impone en todo el ámbito peninsular: la España arcillosa, la España caliza y la España silícea (1).

Las amplias llanuras de ambas Castillas y las planicies de los valles del Ebro y del Guadalquivir forman parte de la *Hispania arcillosa*. Por lo general los únicos relieves de estas regiones se deben al abarrancamiento producido por las aguas salvajes o los cursos regulares de agua; pues, como se trata de materiales recientes, sus estratos permanecen horizontales por no haber sido alcanzados por los plegamientos alpinos; constituyen, pues, extensas planicies de escasa altitud, mal irrigadas, como bien claramente indica la misérrima vegetación esteparia que las agrisa y las charcas saladas delatadoras de un régimen endorreico; son las planicies que Rosalía de Castro diseña bellamente: «*planura, sempre planura — deserto, sempre deserto. Non arbros que vos den sombra, — nin sombra que preste alento;—*»

La *Hispania caliza* corresponde a la zona levantina, en la que predominan y dan carácter al paisaje gruesos espesores de calizas blancogrisáceas «formando montañas en las que abundan las elevadas planicies, aisladas y recortadas por profundas gargantas y hoces, por cuyas escarpadas laderas se asciende con dificultad a las altiplanicies y parameras de suelo horizontal y ocupado por pinares y bosques, por las que no corren las aguas en arroyos, pues las pluviales, tan pronto caen, se filtran en el terreno y se sumen por las fisuras de las calizas para reaparecer en potentes manantiales en el fondo de las gargantas, por donde corren los ríos en estrechos cauces» (2). Forma la España caliza una banda en forma de Z invertida que arrancando de la costa gerundense pasa por la vertiente meridional de los Pirineos hasta Asturias, desciende por las serranías del Sistema Ibérico y sigue las montañas subbéticas hasta el estrecho de Gibraltar.

La *Hispania silícea*, con sus granitos y pizarras, es la que da carácter al Occidente peninsular (Galicia, Extremadura, Guadarrama, Gredos, Sierra Morena). Es la zona que corresponde a las raíces de los plegamientos

(1) E. HERNÁNDEZ PACHECO. *Síntesis Fisiográfica y Geológica de España*. 1932.

(2) E. HERNÁNDEZ PACHECO. *Loc cit.*



más antiguos y a los cimientos de los viejos núcleos peninsulares, por lo cual predominan en ella las penillanuras y relieves seniles, de formas suaves y redondeadas, recubiertas de espeso matorral y bosque de verdor perenne en el Mediodía de España y de frescas landas y bosque caducifolio en el Norte, vegetación que arraiga lozanamente en el suelo producido por la meteorización química de las rocas silíceas.

Sin excluir la influencia poderosa que en esos anárquicos contrastes ejerce el roquedo, es preciso reconocer que el relieve corresponde al trazado de los rasgos fisonómicos esenciales de la Península. Las elevadas cordilleras peninsulares (Pirineos y Sistemas Béticos) señalan el paso por nuestro suelo de los plegamientos alpinos acaecidos al final de la Era Terciaria, los cuales, a la vez que levantaban enhiestas las modernas cordilleras periféricas de la Península, remozaban el antiguo núcleo de la Meseta central, en cuyos bordes se producían fracturas y plegamientos que han dado lugar a los rebordes montañosos de los Sistemas Ibérico y Cantábrico. Los viejos macizos de formas desgastadas quedaron englobados entre estos potentes arcos de plegamiento y las dovelas hundidas formaron amplias depresiones (Guadalquivir, Ebro, etc.) encuadradas entre los macizos antiguos y las cordilleras recientemente formadas. Las hondonadas se convierten en ejes de avenamiento surcados por grandes arterias fluviales cuyos aluviones han colmatado extensas planicies interiores y costeras.

En la configuración del relieve peninsular entran, pues, elementos geológicos y estructurales diversos: macizos geológicos antiguos consolidados en su mayor parte al finalizar la Era Primaria y en los que predominan las rocas silíceas; elevadas cordilleras alpinas de formas enérgicas, emergidas en el transcurso de los paroxismos orogénicos del Terciario, y depresiones y cuencas recientes de hundimiento colmatadas por depósitos arcillosos terciarios y cuaternarios.

La distribución de esos elementos estructurales en el ámbito peninsular determina la configuración del solar hispánico y las diversas regiones naturales fiso-gráficogeológicas que en él se distinguen:

A) *La Meseta Central*, viejo macizo paleozoico, arrasado en su mayor parte y suavemente inclinado hacia

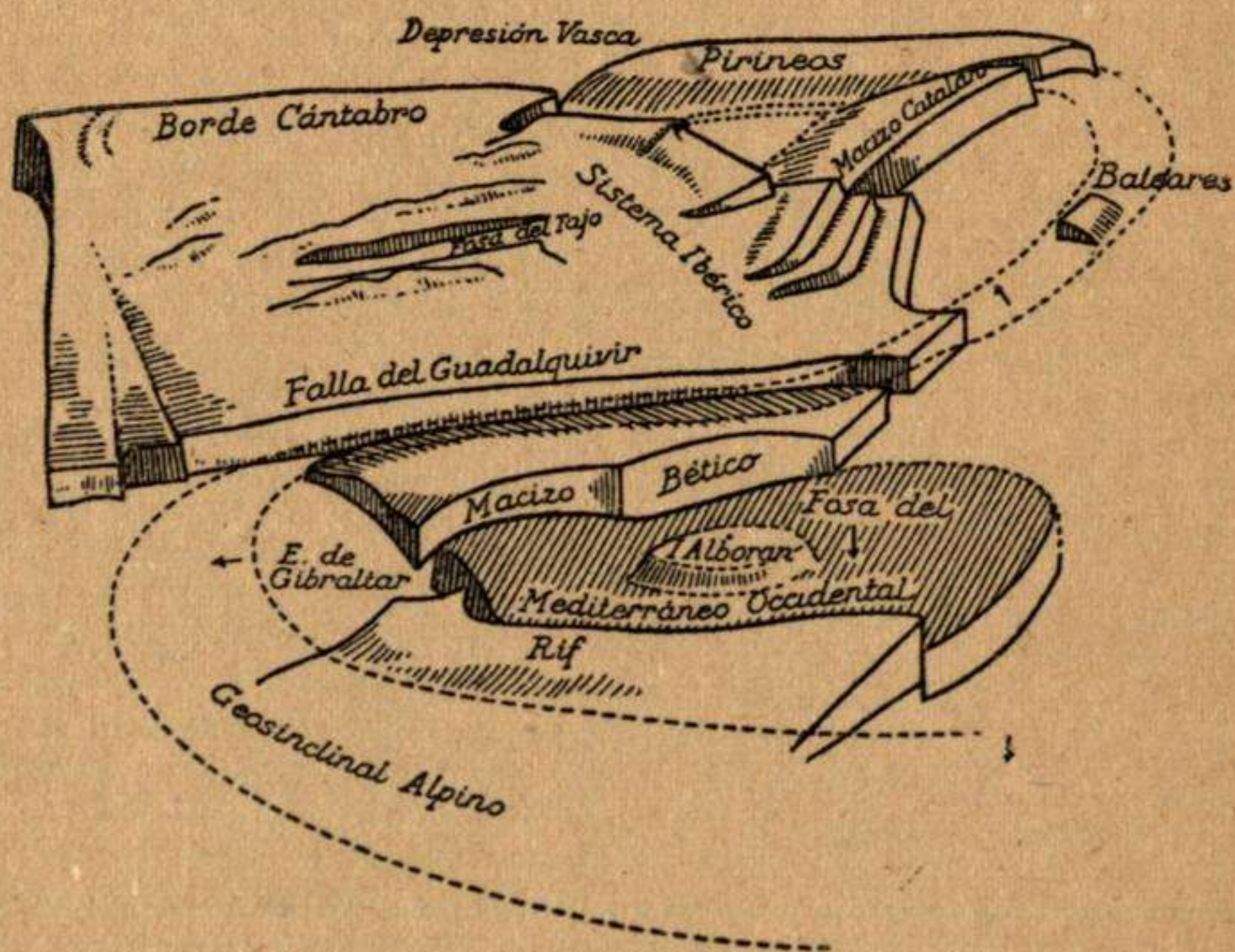


Fig. 88.—Diagrama tectónico de la Península Ibérica, según Carandell (modificado).

el Atlántico; ocupa el Centro y el Occidente peninsulares. En su parte media aparece accidentado por un relieve importante, el *Sistema Central* (Somosierra, Guadarrama, Gredos), verdadera cadena dorsal que divide la Meseta en dos altiplanicies: la submeseta del Norte (Castilla la Vieja y León), avenada por el Duero, y la submeseta del Sur (Castilla la Nueva y Extremadura), avenada por el Tajo y el Guadiana.

B) *Rebordes montañosos de la Meseta*. Los bordes de la Meseta aparecen plegados y fracturados por las olas orogénicas alpinas que se estrellaron contra el rígido cantil del viejo bloque peninsular ya consolidado. En sus bordes se levantan los *Sistemas Cantábrico, Ibérico y Sierra Morena*, cuya arista delimita perfectamente el dominio del zócalo meseteño.

C) *Depresiones externas a la Meseta*, formadas por las cuencas triangulares del Guadalquivir y del Ebro, encerradas entre los rebordes montañosos de la Meseta y las cordilleras periféricas recientes.

D) *Cordilleras periféricas*. Comprenden dos elementos de desigual significación geológica. Uno constituido por los *Sistemas Pirenaico y Bético*, pertenecientes a los plegamientos alpinos. Son las montañas de formas más vigorosas y más recientes de la Península; la primera cierra la Depresión del Ebro y la segunda limita la del Guadalquivir. Otro elemento montañoso periférico es el *macizo costero catalán*, resto rejuvenecido de un antiguo bloque paleozoico, gemelo de la Meseta, que se extendió por las Baleares y Córcega.

Veamos ahora cómo llegaron a consolidarse estas unidades estructurales en el transcurso de los tiempos geológicos y cuáles son los problemas que plantea su origen y constitución.

*Historia geológica de la Península Ibérica*. — Al correr de los tiempos, en el fondo de los mares que cubrieron la Península se han ido depositando los distintos terrenos geológicos que hoy forman el solar ibérico; los grandes paroxismos orogénicos primarios y terciarios plegaron intensamente los terrenos sedimentados en capas horizontales, perturbaron la estratificación primitiva, irguieron elevadas sierras y abrieron paso a potentes masas ígneas del interior que fluyeron al amparo de fracturas profundas. A través de tantas vici-

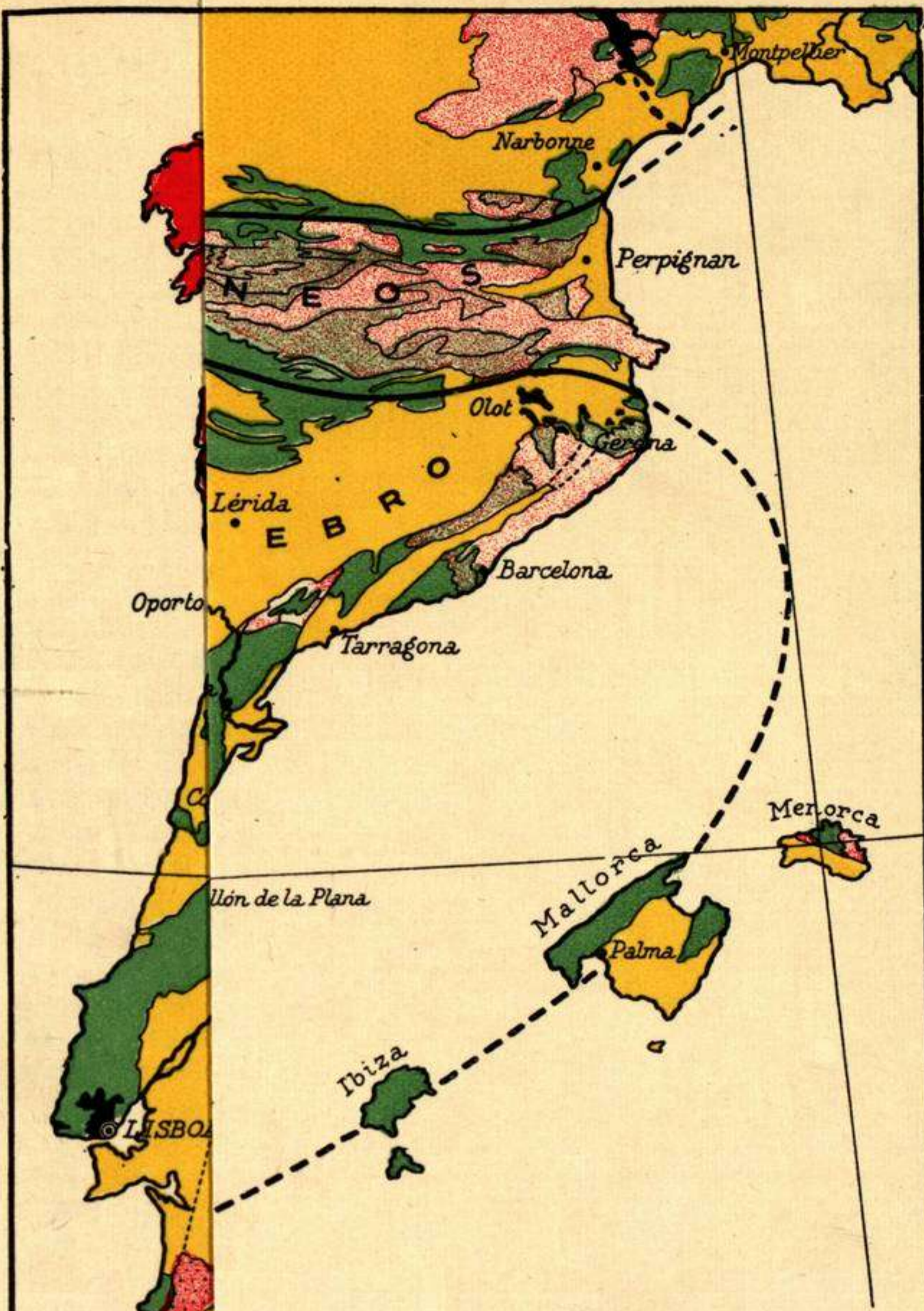
situdes parturientes, la Península Ibérica adquiriría poco a poco su actual configuración.

En la resolución de los enigmas de este magno proceso constructivo trabajan legiones de hombres de ciencia; los documentos de que disponen no son otros que las rocas y las huellas fósiles que éstas encierran. De la inmensa cantera del roquedo patrio es, pues, de dónde pueden arrancarse las todavía enigmáticas páginas de la historia geológica de la Península.

Un primer vistazo al mapa geológico de España, de abigarrado y carnavalesco colorido, nos muestra una confusa distribución de terrenos representados por vivos tonos rojizos, amarillentos o verdosos, según una gama de valor internacional en la ciencia geológica. No es difícil vislumbrar en esa distribución caótica un principio de ordenación; en el Occidente peninsular destacan las manchas rojas y rosadas que representan los terrenos geológicos pertenecientes a la Era Primaria; en el centro de la Meseta y en las depresiones periféricas del Ebro y del Guadalquivir, grandes afloramientos terciarios vienen representados con tonos amarillentos; entre medio, una franja verde caprichosamente recortada en busca de los ejes de las arrugas montañosas señala la extensión atribuida a los terrenos secundarios. Es la misma división tripartita que vislumbra el geógrafo en sus Españas silícea, arcillosa y caliza, respectivamente (Lám. I).

*Terrenos primarios.* — Los terrenos que constituyen la base o zócalo profundo sobre el cual descansan todas las formaciones sedimentarias de la Península Ibérica son los gigantescos batolitos graníticos que afloran en la parte occidental de la Meseta, Galicia, Extremadura, Guadarrama, Gredos, y, en general, en el eje de los principales plegamientos.

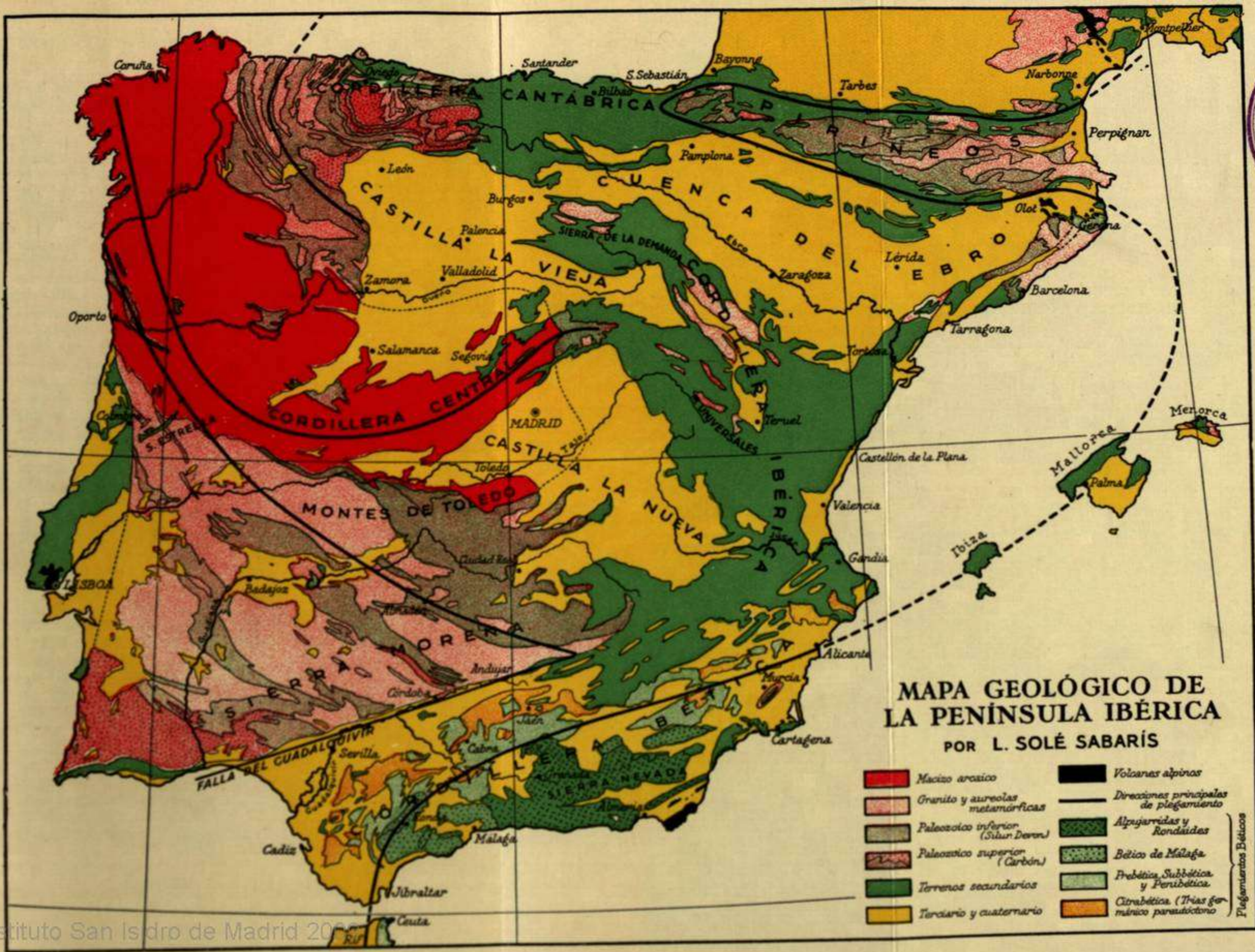
En el antiguo mapa del Instituto Geológico de España se les designaba como *terrenos arcaicos*, por creer que la aparición del magma granítico fué anterior a la sedimentación de enormes espesores de pizarras paleozoicas que arman encima. Las ideas modernas acerca del metamorfismo demuestran que no puede generalizarse ese criterio, pues en muchos sitios las capas esquistas que aparecen encima del granito han sido metamorfoseadas por éste y, por consiguiente, la intrusión mag-



# MAPA GEOLÓGICO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

POR L. SOLÉ SABARÍS

- |   |   |
|---|---|
|  <i>Macizo arcaico</i>                     |  <i>Volcanes alpinos</i>                           |
|  <i>Granito y aureolas metamórficas</i>    |  <i>Direcciones principales de plegamiento</i>     |
|  <i>Paleozoico inferior (Silur. Devon)</i> |  <i>Alpujarridas y Rondaides</i>                   |
|  <i>Paleozoico superior (Carbón)</i>       |  <i>Bético de Málaga</i>                           |
|  <i>Terrenos secundarios</i>               |  <i>Prebética, Subbética y Penibética</i>          |
|  <i>Terciario y cuaternario</i>            |  <i>Citrabética (Trias germánico parautoctono)</i> |
- } Plegamientos Béticos





mática tuvo que ser forzosamente posterior a la sedimentación de los predichos esquistos metamórficos.

El problema respecto al granito consiste ahora en determinar la edad de los estratos que forman a su alrededor las aureolas metamórficas, lo cual tiene que hacerse de una manera indirecta, ya que, por razón de las temperaturas y presiones elevadas que han sufrido, perdieron todo vestigio de vida vegetal o animal que pudiera ilustrarnos acerca de la época en que se depositaron.

Siguiendo el mismo criterio anticuado, dichas aureolas metamórficas (pizarras cristalinas con granates, micas, etc.) que envuelven los batolitos graníticos, se consideraban sistemáticamente como *precámbricas* o *algonquinas*, es decir, anteriores al paleozoico, basándose en que descansaban sobre el pretendido «arcaico» y en que las primeras capas con fósiles que aparecen encima de las zonas metamórficas son de ordinario de la base de la Era Primaria (Cámbrico y Silúrico). Pero no hay ningún argumento de índole paleontológica que certifique la presencia de terrenos sedimentarios anteriores al Cámbrico en la Península Ibérica. Es más, en muchos sitios se ha observado cómo los mismos estratos silúricos o cámbricos que corren en dirección normal u oblicua a los afloramientos graníticos, al acercarse a ellos entran a formar parte de su aureola metamórfica; esto indica, pues, bien claramente, que en dichos casos las aureolas metamórficas se han desarrollado precisamente a expensas de los estratos cámbricos y silúricos. El carácter de rocas metamórficas no indica, pues, nada acerca de la edad absoluta de las formaciones geológicas; así, por ejemplo, hay incluso autores que opinan que el metamórfico de Sierra Nevada se ha formado a expensas de sedimentos secundarios (triásicos). Por esto, con muy buen sentido, los mapas geológicos modernos de la Península han eliminado la atribución cronológica de las aureolas metamórficas indicando simplemente que se trata de un estratocristalino, sin prejuzgar acerca de su edad, que puede variar mucho, según los casos e interpretaciones.

Cuanto se diga, pues, acerca de la presencia de materiales sedimentarios pertenecientes al arcaico en España, tiene que basarse en otros elementos de juicio. Diversos hechos y razonamientos permiten apreciar



la configuración del suelo hispano en la alborada de la historia geológica de la Tierra. En efecto, el ilustre geólogo español Macpherson descubrió en la base del Cámbrico de Sierra Morena, bien caracterizado por una fauna típica e indiscutible, buenos espesores de conglomerados y otras rocas con detritos de grueso calibre, que aumenta hacia el Oeste y Noroeste en dirección al macizo granítico galaicoportugués. Esto indica bien claramente que, al comenzar a depositarse los primeros sedimentos del Paleozoico, existía ya en esas regiones un macizo emergido y activamente derrubiado, que indudablemente tuvo que formarse en el Arcaico.

En segundo lugar, entre el granito y las capas del Cámbrico inferior existe una potente serie de rocas metamórficas (neis, pizarras cristalinas), que por su extraordinario espesor es posible que rebasen los límites del Cámbrico. Además, en algún sitio, se ha señalado entre los conglomerados de base del Cámbrico y el estratocristalino una ligera discordancia que acusa la existencia de movimientos orogénicos anteriores al Cámbrico (*plegamientos huronianos*). Y aun otro hecho significativo es que la edad de los depósitos paleozoicos de la Meseta disminuye hacia Levante. Todo parece, pues, indicar, que ha existido un núcleo occidental arcaico que ha obrado como célula inicial a la cual se han ido agregando sucesivamente los terrenos más modernos que forman el conjunto peninsular.

En cambio, los restantes granitos españoles deben de ser más modernos, puesto que han metamorfoseado los estratos cámbricos, silúricos y aun carboníferos, por lo cual la erupción debió de ocurrir al finalizar la Era Primaria a consecuencia de los paroxismos hercinianos.

Los terrenos primarios bien caracterizados por sus fósiles ocupan grandes extensiones en la Península Ibérica, especialmente hacia el Oeste, bordeando el supuesto macizo arcaico, y en las zonas axiles de los plegamientos alpinos.

El Cámbrico aflora en extensos manchones en Sierra Morena, en donde lleva impresiones de espongiarios, en los montes de Toledo, en el borde Nordeste de la Meseta, y se presenta especialmente desarrollado en Asturias. Se atribuye también al Cámbrico la mayor parte de los grandes espesores de pizarras que en Extremadura, Galicia y Portugal aparecen en la base de las

formaciones paleozoicas. En cambio, muchos de los afloramientos pirenaicos, catalanes y andaluces que se atribuyen a esta época por su proximidad a las zonas de metamorfismo, tienen que ser rebajados en la escala estratigráfica. La repartición geográfica de los terrenos cámbricos que afloran dispersos en la mayor parte de la Península indican que, a excepción del macizo galaicoportugués, aquélla permaneció sumergida en su mayor parte.

El Silúrico se presenta mejor caracterizado, con abundantes fósiles, especialmente los graptolites, profusamente distribuidos en las formaciones esquistas de la Península. En Asturias, Galicia, León, Extremadura, Montes de Toledo y Sierra Morena, alcanza enorme desarrollo. La mayor parte de las provincias de Toledo y Ciudad Real está constituida por pizarras silúricas. También alcanzan buen desarrollo en los Pirineos orientales y en las formaciones paleozoicas del antiguo macizo catalán.

El Devónico se presenta menos desarrollado a causa del movimiento emergente provocado por los plegamientos caledonianos. En la Meseta ocupa solamente algunas extensiones en Asturias y en Sierra Morena. Pero la facies varía mucho; en el Norte consta de grandes espesores de calizas de facies batial, lo mismo que en el Pirineo y en Cataluña, mientras que en el Sur presenta carácter nerítico, tratándose al parecer del relleno de estuarios poco considerables. La distribución del Silúrico y del Devónico en el ámbito peninsular indica que la región levantina seguía sumergida, mientras se acentuaba la emersión de la parte occidental de la Meseta.

Al finalizar la Era Primaria, durante el período Carbonífero, se producen los trastornos orogénicos que tenían que mudar radicalmente la configuración de la Península. Los terrenos depositados en esta época ocupan la mayor parte de la región asturiana; al principio preponderan las formaciones marinas como la llamada caliza de montaña en los Picos de Europa, pero pronto aparecen los depósitos continentales hulleros que señalan la retirada del mar. Los restantes yacimientos hulleros de Sierra Morena, Algarves, etc., señalan con sus formaciones costeras los contornos de la Meseta que debió de quedar totalmente emergida. En el Nord-

este, el macizo ibérico-pirenaico-catalán debió también de emerger en su mayor parte, según acusan las formaciones lacustres desarrolladas en el borde meridional de los afloramientos paleozoicos. El resto de la Península permanecía todavía bajo las aguas.

Los terrenos pertenecientes a la Era Primaria son los de mayor interés económico desde el punto de vista minero. Especialmente las zonas graníticas y metamórficas revisten extraordinaria importancia por su riqueza mineralógica, a causa de que, al propio tiempo que tenían lugar las intrusiones magmáticas graníticas, se depositaban en las grietas por donde circulaban gases y aguas a elevada temperatura importantes concreciones minerales filonianas. A este hecho se deben los ricos yacimientos de plomo (La Carolina y Linares, en la provincia de Jaén) y cobre (Río Tinto, en la provincia de Huelva) que nos dan la supremacía europea en dichos metales. También arman entre estratos primarios, y deben su origen a las inyecciones magmáticas, importantes yacimientos de mercurio (Almadén), plata, cinc, etc. En los estuarios que al final del Paleozoico se formaron al pie de las montañas hercinianas, se desarrolló lozana vegetación que ha dado lugar a las formaciones hulleras asturianas en el borde Norte y a las de Sierra Morena (Peñarroya, Bélmez, Espiel), en el borde Sur.

*Terrenos secundarios.*—A consecuencia de las manifestaciones orogénicas hercinianas, la Meseta emerge definitivamente. En lo sucesivo los terrenos correspondientes a los tiempos mesozoicos se depositarán en la región levantina, pues sólo temporalmente los bordes meseteños serán bañados por las aguas oceánicas.

Un clima cálido y seco debió de reinar en la Península al comenzar el Secundario; así lo acusan las areniscas y conglomerados de vivos tonos rojizos del Triásico, formaciones continentales que se encuentran recubriendo en gran parte las montañas hercinianas, que enérgicamente atacadas por la erosión acaban convirtiéndose en penillanuras. Durante el Triásico, la mayor parte de la Península permaneció emergida; solamente en el Triásico medio (*Muschelkalk*) un mar de escasa profundidad, según delatan las dolomias y calizas que predominan en el Sistema, invade los macizos hercinianos. Por el Este las aguas marinas alcanzan

hasta el centro de la Meseta. La mayor parte del macizo ibérico catalán se sumerge también. Sólo en el Sur de España un mar de cierta profundidad, el geosinclinal alpino del Tetys, señala con los depósitos del triás, llamado de facies alpina (calizas y margas), una facies batial constante. Los ammonites y demás animales que se desarrollan profusamente en los mares de Andalucía difieren en absoluto de los que se encuentran en el resto de la Península en el llamado triás de facies germánico, rico en yesos y arcillas de facies continental y lacustre. Al final del período, y como reminiscencia de la orogenia herciniana, tienen lugar las erupciones de ofitas.

Durante el Jurásico y Cretácico se acentúa la invasión marina. Preponderan las calizas batiales con algunas hiladas margosas en las que se encuentran animales de mares cálidos, coralaris, belemnites, ammonites, etc. Extensas formaciones de esta índole se extienden por todo el sistema Ibérico, Pirineos y Andalucía. En el Cretácico medio, el mar penetra más allá de Segovia, se sumergen completamente los bordes orientales y septentrionales de la Meseta y las aguas marinas llegan hasta Oviedo. El macizo Ibérico se sumerge también en gran parte. Estos movimientos lentos de elevación y descenso en bloque son los únicos que perturban ligeramente la tranquilidad orogénica del Mesozoico. Al finalizar la Era tiene lugar una regresión importante, durante la qual aflora casi toda la Península; en algunas regiones (Pirineos, Sistema Ibérico, etc.) se originan formaciones lacustres cuya vegetación da lugar a importantes yacimientos ligníferos, los cuales, aparte de la explotación de las calizas como material de construcción, y de las cales y cementos, son las únicas manifestaciones económicas a que dan lugar los terrenos mesozoicos españoles.

*Terrenos terciarios.*—Ocupan los terrenos terciarios extensiones enormes en la Península; León, ambas Castillas, y las depresiones del Guadalquivir y del Ebro, aparte de otros retazos de menor importancia, están constituidos por sedimentos depositados en los mares y lagos que durante la Era Terciaria se extendieron por las tierras hispánicas.

Al empezar el Eoceno continúa la regresión mesozoica; pero pronto el dominio marino invade extensos



territorios. La Meseta vuelve a alcanzar contornos parecidos a los que tenía cuando la transgresión cretácica; el Macizo Ibérico Catalán se hunde completamente y las aguas cubren las elevadas cimas del Pirineo hercyniano. En el mar pululan millones de foraminíferos, los Nummulites, a cuyas expensas se construyen espesores considerables de calizas. Después, lentamente, el mar se retira, emergen extensas regiones y las todavía sumergidas pierden profundidad; en lugar de las calizas se depositan rocas detríticas finas, el *flysch* (1) eoceno, que colmata entre otras la depresión vasca abierta entre la Meseta y el Pirineo. La emergencia de los primeros plegamientos alpinos cierra la depresión del Ebro, que se convierte en un lago, en el que pronto, bajo un régimen acentuadamente seco, se precipitan los yesos y sales de la región potásica navarrocatalana. El mismo régimen continental se impone en la Meseta, en donde empiezan a depositarse areniscas y arcillas del Oligoceno.

Durante el Mioceno continúa el mismo carácter lacustre del Oligoceno. El lago de la depresión del Ebro, ya muy reducido, se extiende todavía entre Zaragoza y Logroño y comunica con la depresión castellano-leonesa de la submeseta superior. En ambas Castillas impera el régimen endorreico; al principio se supuso que se trataba de grandes lagos en los cuales se depositaron los materiales aportados por ríos caudalosos, los cuales dieron lugar a las arcillas, molasas y areniscas que con sus estratos horizontales rellenan las cuencas del Tajo, del Guadiana y del Duero. En realidad se trata de pequeños lagos y lagunas, propios de los países de régimen estepario, en las orillas de los cuales pacían numerosos rebaños de herbívoros. El mioceno marino adentró alguna cuña por los mares de la periferia (Cataluña, Valencia) y relleno casi enteramente el valle del Guadalquivir, que en aquel entonces debía de constituir un brazo de mar, predecesor del actual estrecho de Gibraltar, entre Sierra Morena y las montañas Béticas que acababan de emerger con las últimas y potentes manifestaciones orogénicas alpinas, con

(1) Se denomina *flysch* a las rocas de facies nerítica, ordinariamente de mucho espesor, que se encuentran empastando los plegamientos alpinos; son los sedimentos que iban depositándose mientras éstos emergían.

las cuales simultanearon erupciones volcánicas de importancia. La existencia de monos antropomorfos (Seo de Urgel) indica la existencia de un clima subtropical.

En el Plioceno, la Península adquirió casi los contornos que posee en la actualidad. Sólo algunos golfos profundos recortaban el litoral. Por el valle del Guadalquivir, el mar penetraba hasta más allá de Sevilla; la llanura valenciana y una franja costera de los litorales catalán y andaluz estaban todavía sumergidas en un mar de escasa profundidad, en el que se depositaban las arcillas y areniscas amarillentas. Como repercusión final de los paroxismos alpinos se abre el estrecho de Gibraltar.

*Terrenos cuaternarios.* — Los depósitos cuaternarios de la Península son casi todos de origen continental. Se reducen a los mantos de aluviones, arcillas y arenas, que recubren superficialmente los terrenos más antiguos. Al pie de las grandes cordilleras su espesor alcanza algunos metros y forma llanuras aluviales de piedemonte en los bordes del Pirineo, Sistema Central, etc.

Corresponden también a esta época los depósitos morrénicos arrojados por los glaciares que cubrían enteramente el Pirineo y los macizos más destacados de los Sistemas Cantábrico, Ibérico y Sierra Nevada. En ellos se observan las variaciones faunísticas correspondientes a los cambios de clima de cada período glacial, que acusan las osamentas encontradas en las cuevas prehistóricas y en los aluviones de los ríos.

## FORMACIÓN DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

### Unidades tectónicas

Al estudiar la evolución históricogeológica de la Península Ibérica han quedado bien sentados los dos hechos esenciales que definen su estructura y determinan su configuración. Primero, la constitución a partir del Paleozoico de un gran bloque emergido, la *Meseta Central*, que sólo temporalmente, y aun en sus regiones limítrofes, ha sido invadida por las grandes transgresiones mesocretácica y eocénica. Y en segundo lugar la formación, durante la primera mitad de los tiempos terciarios, de los *sistemas de plegamiento alpino* (*Siste-*

mas Cantábrico, Ibérico, Pirenaico y Bético) que accidentan enérgicamente la periferia hispánica. Las restantes unidades fisiográficas (depresión del Ebro, depresión del Guadalquivir, etc.), son el resultado de la colmatación de las fosas originadas cuando se constituyeron aquellas unidades tectónicas fundamentales con los derrubios arrancados de las propias sierras que acababan de emerger.

La tectónica geológica trata de averiguar primeramente la estructura de estas unidades principales (Meseta y cordilleras alpinas), para tratar de investigar ulteriormente cómo se formaron y las fuerzas que intervinieron en su gestación.

### Los Hercínides españoles

Como se ha visto, la Meseta es el núcleo primitivo de la Península al cual en el transcurso de los tiempos se han ido adosando otros terrenos modernos. Comprende, pues: *a)* una *base o zócalo* constituida por materiales paleozoicos endurecidos por la granitización y el metamorfismo, que ha obrado en la orogenia como pilar resistente contra el cual se han estrellado los plegamientos modernos, y *b)* una *cobertera* sedimentaria, de edad reciente y a veces de escaso espesor, que por el Centro y Levante recubre el zócalo antiguo.

El zócalo de la Meseta empieza a formarse con los plegamientos más antiguos huronianos y caledonianos, pero adquiere su personalidad definida al terminar el Paleozoico, durante el gran paroxismo herciniano; por esto la Meseta es el representante mejor caracterizado de los *Hercínides* españoles.

De acuerdo con su proceso formativo, se distinguen en el zócalo meseteño dos elementos integrantes: 1) un núcleo antiguo, el macizo granítico de Galicia, de edad huroniana (arcaico), y 2) la masa sedimentaria paleozoica levantada por los plegamientos caledonianos y hercinianos.

El núcleo huroniano galaicoportugués se extiende según Staub desde el Cantábrico hasta las riberas del Tajo; las sierras de Guadarrama y Gredos serían una apófisis de este macizo, cuya tendencia a la emersión es manifiesta. Los empujes orogénicos posteriores chocaron contra este pilar resistente de tiempo ha endurecido; por eso la presión ejercida en sus bordes úni-

camente pudo producir abombamientos de gran radio de curvatura, seguidos de una distensión que provocó fracturas y hundimientos de dovelas, hecho bien patente en el interior de Galicia. El mar paleozoico rompería contra los acantilados de este macizo arcaico, y en él se irían depositando, a progresiva distancia de la costa, las pudingas, areniscas (transformadas en cuarcitas por el metamorfismo) y pizarras del Cámbrico y del Silúrico.

Los *plegamientos caledonianos* se hicieron sentir sin duda en la Meseta en vías de formación. En las zonas todavía sumergidas se acusa un cambio ostensible de facies; abundan los materiales detríticos y en algunos puntos se señala una discordancia marcada e incluso ciertas lagunas estratigráficas entre el Silúrico y el Devónico; en otros lugares los sedimentos devónicos tienen marcado carácter nerítico. Es de presumir, pues, que los *plegamientos caledonianos* determinaron una breve emersión en algunas partes de la Meseta y aun verdaderos fenómenos de plegamiento, pero sin que tuvieran mayor alcance.

La Meseta no adquiere su verdadera significación hasta que empiezan los *plegamientos hercinianos* con que finaliza la Era Primaria; con ellos surgen del fondo del mar paleozoico espesores enormes de pizarras, cuarcitas y calizas intensamente replegadas, las cuales el magma granítico que comparece con el paroxismo orogénico las suelda al viejo núcleo arcaico, al propio tiempo que se introduce por entre los ejes anticlinales y produce extensas aureolas metamórficas. Según Hernández Pacheco, la intensidad del paroxismo orogénico herciniano fué de tal envergadura que a él deben atribuirse casi todos los batolitos graníticos de la Meseta.

Los *plegamientos hercinianos* no pudieron desarrollarse libremente sino que tuvieron que contornearse y adaptarse a la forma del antiguo núcleo arcaico. A esto se debe, según Staub, las dos flexiones que sobre el mapa geológico dibujan las direcciones de los *plegamientos* de la Meseta: la llamada rodilla asturiana y la flexión extremeña.

El paleozoico asturiano está constituido por un amontonamiento de pliegues isoclinales apretados que dibujan sobre el terreno un arco convexo muy cerrado hacia el macizo gallego, contra el cual se estrujaron en su formación. En la banda interna de este arco los depó-



sitos carboníferos acusan un régimen lacustre que se desarrollaría después de la formación de los pliegues. El paleozoico del resto de la Meseta forma también una serie paralela de pliegues apretados y dirigidos de NO. a SE., ligeramente encorvados en el centro en el contacto con el pilar resistente del núcleo arcaico. Al llegar a Sierra Morena quedan bruscamente interrumpidos por una falla o flexión que ha hundido el labio meridional. En esta región también los depósitos hulleros alineados según la dirección de plegamiento precisan la edad del paroxismo.

Nada indica en el relieve actual de la Meseta la estructura que señala el mapa geológico. Las líneas directrices del relieve marchan en completo desacuerdo con la estructura; en vano se buscaría el arrumbamiento NO.-SE. de los pliegues hercinianos en las alineaciones montuosas. Esto se explica porque, después de formada, la Meseta permaneció casi siempre emergida, con lo cual su relieve ha sufrido una demolición total; en una palabra, ha sido convertida en una penillanura, perfectamente desarrollada en Extremadura, por ejemplo. La cobertera sedimentaria miocénica esconde en gran parte, bajo sus estratos horizontales, la peniplanicie.

Después, los *plegamientos alpinos* removieron el viejo zócalo paleozoico. Sin embargo, la sólida estructuración adquirida con el paroxismo herciniano le convirtió en un macizo resistente y dotado de gran rigidez, incapaz ya de plegarse; en todo caso, los empujes orogénicos más vigorosos sólo pudieron producir suaves abovedamientos o remover las dovelas, produciendo resbalamientos verticales de alguna importancia según los planos de fractura ya existentes, como el del Sistema Central, pero que la erosión había ya casi borrado. Con esto el relieve se rejuvenece, las fallas se remueven, se desnivelan los compartimientos y se acentúa la concavidad de las depresiones castellanas, que fueron pronto colmatadas por el manto de derrubios arrancados a las próximas montañas rejuvenecidas. El plegamiento alpino en la Meseta no hizo, pues, más que vigorizar los rasgos ya trazados por el plegamiento herciniano y que la erosión multiseccular había ya casi borrado.

La *cobertera sedimentaria* que se extiende por el Centro y Levante de la Meseta oculta casi la mitad del zócalo paleozoico. En el centro se reduce a un delgado manto de derrubios oligomiocénicos de colmatación de

las cuencas castellanoleonesas. Pero en la periferia alcanza mayor consistencia. Ordinariamente está constituido por estratos triásicos, cretácicos y eocénicos depositados en los bordes de la Meseta en los momentos de progresión del mar. Caracteriza como es natural todos estos depósitos su facies nerítica, ya que se trata de inmersiones esporádicas y de escaso alcance. Faltan además innúmeros términos stratigráficos que corresponden a los momentos en que el mar quedaba circunscrito a las depresiones vecinas a la Meseta. Como que las regiones centrales fueron alcanzadas menor número de veces por las transgresiones oceánicas, el espesor de la cobertera sedimentaria disminuye hacia el interior de la Meseta; en el centro, sólo algunos retazos testimoniales triásicos señalan la transgresión máxima.

Debe imputarse a los plegamientos alpinos las dislocaciones y compresiones sufridas por estos bordes de la Meseta, por lo cual serán estudiados a continuación junto con los Alpides españoles.

### Los Alpides españoles

Las serranías más importantes que surcan la Península Ibérica (Pirineos, Sistemas Cantábrico, Ibérico y Bético) se formaron en el transcurso de la Era Terciaria, aproximadamente al mismo tiempo que los Alpes, Atlas, Apeninos, Cáucaso, Balcanes, Cárpatos y cuantas montañas se alinean en los bordes del Mediterráneo a lo largo del llamado plegamiento alpino. De aquí la designación de *Alpides* que reciben estos sistemas montañosos.

Los plegamientos alpinos no forman una línea recta de uno a otro extremo del Mediterráneo, sino que tuvieron que adaptarse y contornearse los antiguos macizos hercinianos con los cuales chocaron al formarse, de la misma manera que hemos visto que los pliegues hercinianos bordearon los macizos preexistentes. De aquí el trazado sinuoso de los arcos de plegamiento alpinos.

Uno de los problemas capitales que plantea la tectónica de los Alpides es seguir el curso de esta línea de plegamiento a su paso por la Península Ibérica, teniendo buen cuidado de no confundirla con las montañas de tipo germánico que simultáneamente con ella se formarían en los bordes de los macizos resistentes que hacían de antepaís; es decir, se trata de identificar las distintas partes que se distinguen en los plegamientos alpinos: antepaís, cordillera marginal, antefosa, plie-

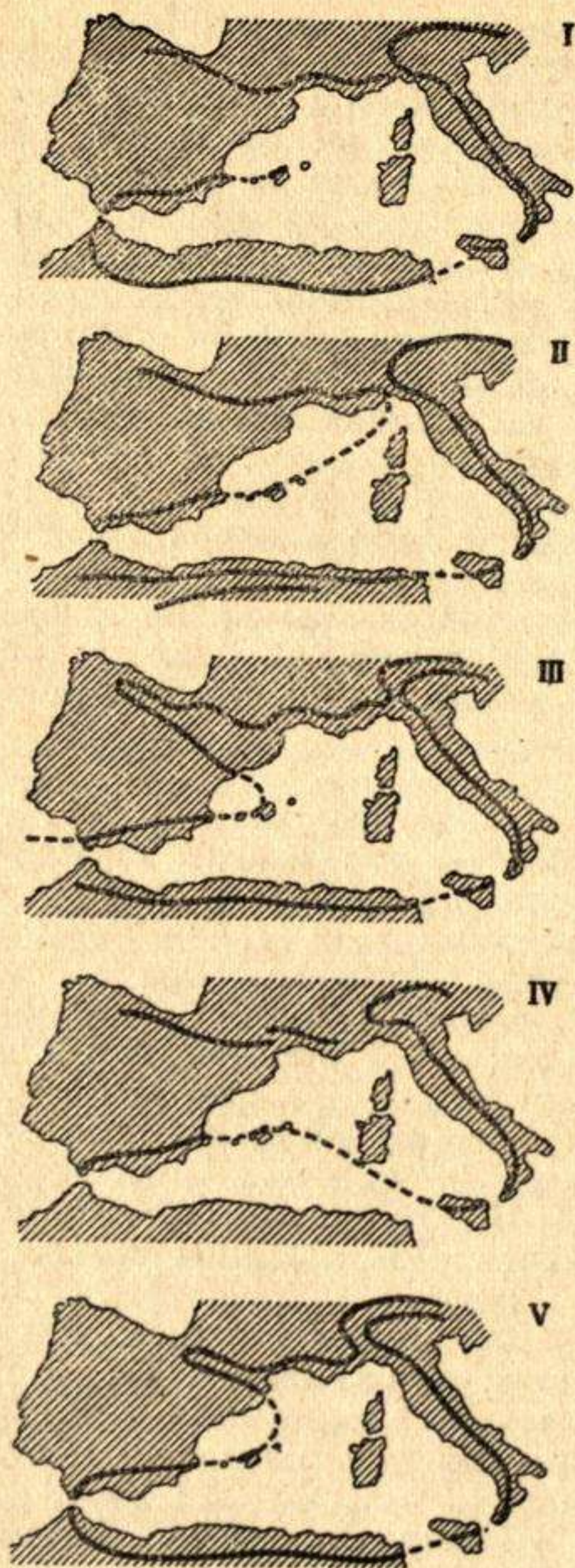


Fig. 89. — Interpretación del curso de los Alpides en el Mediterráneo occidental. I, según Suess; II, P. Termier; III, Kober; IV, Staub; V, Stille.

gue alpino propiamente dicho e interfosa (Capítulo IV).

No hay acuerdo entre los diversos tratadistas acerca del curso que los plegamientos alpinos siguen a través de la Península. En el esquema adjunto se indican las principales soluciones dadas al problema, haciendo pasar el arco alpino bien por el Pirineo y Sistema Ibérico, como Kober, o bien eliminando ambos sistemas de la línea principal de plegamiento y haciéndola pasar directamente de los Alpes a Andalucía a través de las Baleares, como Staub, o bien suponiendo, como Stille, que los Pirineos constituyen una cordillera doble que a través de Baleares enlaza con las Sierras béticas y por otra con los Alpes, o bien prolongando el sistema Bético hacia los Algarves para perderse en el Atlántico, o bien tomando el camino del Atlas rifeño a través de la flexión del estrecho de Gibraltar (fig. 89).

Únicamente el estudio de la estructura y del desarrollo orogénico de nuestros Alpides puede aclararnos estos interesantes problemas tectónicos europeos cuya clave se encuentra en las montañas españolas.

*Los rebordes montañosos de la meseta.*—La Meseta central está suavemente inclinada hacia el Atlántico, razón por la cual sus arterias principales, Duero, Tajo y Guadiana, vierten en este mar. En cambio, del lado opuesto, un desnivel brusco, un verdadero escalón, separa las altiplanicies castellanas de las tierras periféricas colindantes. De aquí el carácter montuoso y fuertemente accidentado con que aparecen los rebordes de la Meseta contemplados desde las depresiones periféricas del Guadalquivir o del Ebro, desde Zaragoza o Córdoba, por ejemplo.

*Los Pirineos.*—La arruga montuosa que hace de divisoria política y geográfica entre Francia y España debe considerarse que termina en las montañas vascas, pues ni geológica ni geográficamente las Sierras cantábricas pueden considerarse, como en un tiempo se supuso,

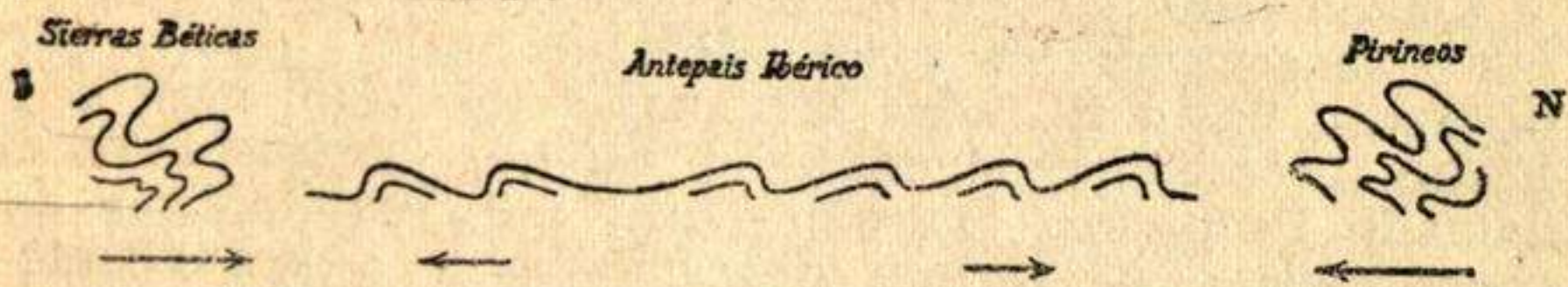


Fig. 90.—Direcciones de los plegamientos en los Alpes españoles (Stille).

prolongación del sistema pirenaico. La llamada depresión vasca, estrecha fosa colmatada por depósitos cretácicos y eocénicos, señala una divisoria bien marcada entre el Pirineo y la Montaña Cantábrica, que como es sabido es simplemente el reborde comprimido de la Meseta.

El Pirineo forma a la manera de un pliegue gigantesco cuyos materiales se disponen simétricamente a banda y banda de una *zona axil* constituida por materiales paleozoicos. Interésanos particularmente la vertiente meridional, pero relaciones genéticas inseparables nos llevarán a tratar incidentalmente de la vertiente atlántica.

Constituyen la zona axil importantes macizos graníticos (Maladeta, etc.) y extensos manchones de pizarras silúricas, espesores notables de calizas devónicas, y conglomerados y areniscas del carbonífero, cuyo carácter continental denota que existió un Pirineo herciniano.

Éste se extendería principalmente desde el Centro hacia Levante, en donde el paleozoico forma actualmente un gran afloramiento de forma triangular con el vértice hacia Occidente. Según los geólogos de la Escuela de Gottinga, las tierras emergidas al final del paleozoico alcanzarían además buena parte de la depresión del Ebro y macizo costero catalán, formando un bloque de notables dimensiones (*Macizo Ibérico*) que movimientos orogénicos posteriores sepultaron en las profundidades de la depresión del Ebro. Esta zona axial predominantemente esquistosa forma la cresta divisoria elevada, con cimas escarpadas esculpidas por el glaciario cuaternario y amplios valles en *U* que señalan el paso de los glaciares. Es el Pirineo propiamente dicho de los geógrafos, caracterizado por sus formas bravías, los bosques de coníferas y los prados alpestres.

A cada lado del eje paleozoico existe amplia faja de terrenos secundarios preponderantemente calizos, que se elevan hasta altitudes cercanas a los 2.500 metros y llevan intercaladas algunas depresiones margosas. Es el llamado Prepirineo, caracterizado por sus cantiles de rocas calizas, de formas descarnadas y pobre vegetación; los ríos pasan encajados en hoces y gargantas entre paredones elevados; faltan las formas glaciares, pero en cambio hay bastantes manifestaciones cársticas que acrecientan la sequedad, con lo que la montaña pierde completamente su aspecto alpestre.

En un corte transversal de Norte a Sur se distinguen en el Pirineo tres regiones: *a*) la zona marginal caliza (Turbón, Boumort, Peña Collarada, Pedraforca); *b*) depresión margosa central (Canal de Berdún, Cuenca de Tremp; *c*) plegamiento de las Sierras (Sierras de Guara, del Cadí, etc.).

La estructura del Prepirineo, en sus líneas generales, es bastante sencilla: se trata de dos pliegues paralelos, un sinclinal y un sistema apretado de pliegues anticlinales (*anticlinorium*). La línea anticlinal corresponde a la zona de las Sierras, en donde afloran las calizas triásicas y cretácicas. La zona marginal corresponde al borde en cuesta de las calizas mesozoicas o al frente de un conjunto de pliegues anticlinales; entre ambas barreras montuosas yace el sinclinal de la depresión margosa.

En algunos sitios esta estructura se complica con la

aparición de otras regiones de desarrollo local. Entre la zona axil y la marginal del Prepirineo se intercala en la región catalanoaragonesa la llamada *zona de los Nogueras*, en donde, a causa de la plasticidad de las arcillas triásicas, se presentan en confuso apretujamiento el mesozoico y el paleozoico; en esta zona hay pequeñas cobijaduras del paleozoico sobre su cobertera secundaria y corrimientos que han transportado a algunos kilómetros de distancia fragmentos paleozoicos, verdaderos macizos satélites arrancados a la zona axil. En otras regiones, como en Cataluña, la depresión margosa central se desdobra, por un pliegue medio, en dos sinclinales y un anticlinal roto (Sierra del Montsec). En cambio, hacia el Este, se reduce tanto el Prepirineo que los depósitos terciarios de la Depresión del Ebro entran en contacto con la zona axil.

De estos rasgos estructurales del Pirineo se deduce que se trata de una cordillera de plegamiento sencillo, formada por una serie alternante de anticlinales y sinclinales, rotos en algunos sitios, con ligeros cabalgamientos. Es inútil buscar aquí estructuras complicadas de tipo alpino. León Bertrand quiso reconocer en la vertiente septentrional cuatro capas de corrimiento parecidas a las de los Alpes y que designó por A, B, C y Z; pero estudios posteriores hacen descartar definitivamente la existencia de corrimientos de importancia. Únicamente en su terminación oriental el macizo catalán ha comprimido los materiales intermedios, de tal suerte que ha dado lugar a algunas escamas de corrimiento, como las del Ampurdán y Garrotxa.

### Sistemas Béticos

A raíz del XIV Congreso Geológico Internacional que en el año 1926 se celebró en España, las Sierras béticas atrajeron las miradas de los grandes tectonicistas europeos. Desde entonces se han convertido en un verdadero campo de batalla para algunas Escuelas geológicas alemanas, francesas, holandesas y suizas, preludio de una lucha real y cruenta que, teniendo por escenario el mismo campo de operaciones, ha venido a truncar en seco aquellos escarceos científicos.

Los primeros geólogos, entre ellos el español Macpherson, que se ocuparon en la geología de los Sistemas

Béticos, creyeron reconocer una disposición estructural sencilla, de plegamientos no muy diferentes a los del Pirineo. Staub, geólogo suizo buen conocedor de los Alpes, fué de los primeros que quisieron ver en las Sierras andaluzas las complicadas estructuras de tipo alpino en capas de corrimiento. Después, una legión de geólogos nacionales y extranjeros se ha ocupado de este problema que aun permanece sin resolver de una manera satisfactoria y que se encuentra planteado en los siguientes términos: ¿Constituyen los Sistemas Béticos una serie amontonada de capas de corrimiento trasladadas desde regiones lejanas, como los Alpes o, por el contrario, son pliegues autóctonos que se formaron *in situ*, como los Pirineos o el Jura?

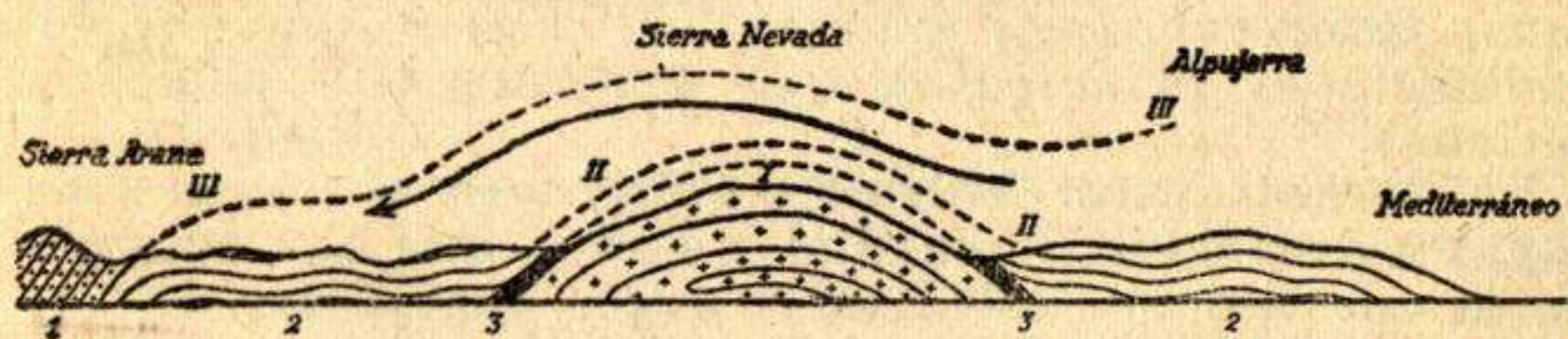
Los geólogos que creen en la *autoctonia* de la Cordillera, opinan que las pizarras cristalinas de Sierra Nevada y de las montañas próximas constituyen una zona metamórfica análoga a la del Pirineo o a la Meseta, es decir, formada por depósitos de edad paleozoica. Sobre esta zona axial se habrían depositado después los sedimentos secundarios y terciarios que posteriormente fueron plegados en el mismo sitio de sedimentación. Por lo tanto, Sierra Nevada vendría a ser como la zona axial del Pirineo, el centro del Sistema de plegamiento, quizá esbozado ya durante el paroxismo herciniano.

En cambio, los defensores de la *aloctonia* opinan que los esquistos cristalinos de Sierra Nevada son depósitos triásicos metamorfoseados por las presiones orogénicas, y que, como ocurre en los Alpes, este terreno metamórfico no está enraizado, sino que ha sido arrastrado desde el Norte de África junto con los demás terrenos que se hallan apelotonados formando mantos o capas de corrimiento. El substrato autóctono de la Meseta no aparece hasta más al Norte de Alicante o de Jaén, y sobre él, gracias a la plasticidad de ciertos niveles margosos, especialmente del Triás, que han obrado como lubricante, han corrido las Sierras béticas. Las raíces de estos pliegues sería necesario buscarlas en las montañas marroquíes; y por lo tanto Sierra Nevada no sería más que una ventana abierta por la erosión en las capas béticas, la cual habría permitido que se asomaran los materiales metamórficos de la capa de corrimiento más profunda; sería el equivalente de la capa Penina o del Hohe Tauern de los Alpes.

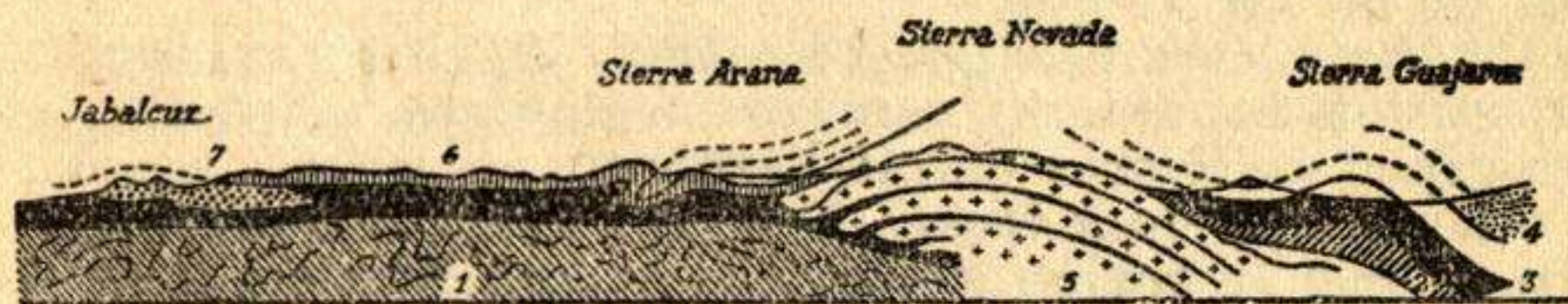
LOS ALPIDES ESPAÑOLES



I. 1, substrato autóctono herciniano. 2, secundario autóctono. 3, cristalino del Veleta. 4, mesozoico de la zona del Veleta. 5, núcleo del manto de Granada. 6, mesozoico del manto de Granada. 7, manto Bético. 8, jura y creta del manto Bético. 9, cuencas terciarias.



II.



III. 1, substrato autóctono. 2, 3 y 4, capas de Lújar, Lanjarón y Guájar (Alpujárridas). 5, cristalino de Sierra Nevada. 6, prebética. 7, subbética.

Fig. 91.—Tres interpretaciones de los plegamientos béticos según la teoría de las capas de corrimiento. I, Staub; II, Brouwer; III, Blumental y Faliot.



La variada nomenclatura que han recibido las serranías andaluzas anda de acuerdo con esas diversas maneras de pensar. Los partidarios de la autoctonía distinguen simplemente dos líneas montañosas paralelas, una que corre a lo largo del litoral y en la que figuran las moles principales del Sistema (Sierra Nevada, Alpujarra, Mijares, Estancias), a la que denominan *Sistema Penibético*, y otra, interior, de menor categoría (Cabra, Jabalcruz, Sagra, Cazorla), separada de la anterior por una línea de depresiones (Vega de Granada, Hoyas de Baza, Guadix, Antequera, etc.) interrumpida a trechos por pedúnculos montuosos, y recorrida por los ríos Fardes, Guardal, Segura y Genil en cursos longitudinales paralelos a las líneas de plegamiento, a la que denominan *Sistema Bético*. En cambio, los partidarios de las capas de corrimiento quieren ver mayor número de ondulaciones principales, que designan con nombres variados.

Existe desacuerdo entre los autores en el número de capas a distinguir. Blumental y Fallot, que han resumido la constitución estructural de la Cordillera, distinguen los siguientes mantos de corrimiento:

I. *Capas de Lanjarón, Lújar y Guájar*. Forman las llamadas *Alpujárridas y Rondaides*. Se extienden por el Sur de Sierra Nevada.

II. *Cristalino de Sierra Nevada*. Aparece en donde la erosión ha abierto ventanas tectónicas a través de las capas anteriores que la recubren.

III. *Bético de Málaga*. Forma un manto que se extiende por la región malagueña y que ha pasado por encima de las dos capas anteriores.

IV. *Capas Prebética, Subbética y Penibética*. Forman una alineación de serranías calizas que se extienden de Este a Oeste y que bordean la depresión del Guadalquivir. Son las más superiores.

Otros autores, como Staub y Brouwer, simplifican bastante el número de capas y creen que los Sistemas Béticos son de estructura más sencilla, según se expone en el cuadro de la página 289, en el que, además, figura la equivalencia con las capas de los Alpes, con las cuales se ha comparado la estructura de las montañas andaluzas.

Estos autores pueden diferir en los detalles, en atribuir tal o cuál terreno a determinado manto, en el nú-

mero y distribución de éstos, en los detalles de la interpretación estructural; pero, en general, hay acuerdo respecto a asimilar los Sistemas Béticos a unas montañas de estructura parecida a los Alpes y no a los Pirineos.

ALPES	H. A. BROUWER	R. STAUB	M. BLUMENTAL
Autóctono . . . . .			Macizo ibérico
Parautóctono . . . . .			Citrabética (Trías germánico)
Capas alpinas superiores . . . . . (Dinárida y Austridas)	Cadena Subbética	Manto Bético	} Prebética } Subbética
Capas alpinas inferiores . . . . . (Helvétida)	Manto Bético	Manto de Granada	{ Penibética { Alpujarridas y { Bético de Málaga
Capa pennina . . . . .	Zona mixta Cristalino de Sierra Nevada	Zona del Veleta	Ventana de Sierra Nevada

Con todo, en estos últimos tiempos, voces autorizadas empiezan a argumentar en pro de la autoctonia de algunas partes de la Cordillera. Sierra Nevada es ya para ciertos autores un abombamiento autóctono formado por materiales paleozoicos, como lo prueba el hecho de que formen una penillanura recubierta, como todas las penillanuras hercinianas de la Meseta, por depósitos triásicos discordantes; de aquí se deduce, como sospechaban muchos, que ha existido una Penibética herciniana. El propio Brouwer, uno de los defensores más entusiastas de la idea de los corrimientos, ha rectificado ya en más de una ocasión. Después del fracaso de la aplicación de la teoría de los mantos de recubrimiento al Pirineo, el buen sentido impone una mayor prudencia.

## SÍNTESIS GEOLÓGICA DE AMÉRICA DEL SUR

El Continente Sudamericano forma un triángulo de tierras cuya base roza las bajas latitudes ecuatoriales y cuyo vértice alcanza cerca de los 45° de latitud Sur. Sus costas, muy escasamente articuladas, se adaptan estrechamente al relieve interior, bordeando por el Oeste la ingente cadena de los Andes, la Cordillera por antonomasia, y por el Este las Sierras brasileñas y de las Guayanas. Los tres únicos entrantes de consideración que accidentan el perfil costero levantino, el golfo de Buenos Aires y los de las desembocaduras del Orinoco y del Amazonas, corresponden a su vez a bruscas interrupciones de las montañas litorales que a través de ellas dan entrada a extensas depresiones interiores.

Faltando los accidentes montañosos transversales, la línea de costa resulta casi rectilínea o ligeramente sinuosa en grandes extensiones, ofreciendo un gran contraste, por ejemplo, con el recortado perfil costero europeo.

Otro hecho destacable es la aguzada terminación meridional del Falkland, retorcida hacia Oriente, como es regla, según se ha visto anteriormente, de los apéndices de los continentes australes, hecho que se interpreta por los partidarios de las traslaciones continentales por haber quedado estos apéndices terminales rezagados en la traslación a la deriva de los bloques continentales. Las Nuevas Antillas, con sus guirnaldas de islas, prolongan esta punta americana como una flecha que parece indicar que la continuación de las Sierras andinas debe buscar en dirección a las tierras del Falkland.

Por el Norte entra en juego un nuevo elemento en la configuración de América del Sur; un delgado pedúnculo, el istmo de América Central, une ambos continentes americanos; enfrente, las festoneadas guirnaldas insulares de las Antillas apuntan otro cordón que no llegó a cristalizar. Pero nada más engañoso que estas delgadas bandas de tierras que a manera de cordón umbilical unen las dos Américas. Las relaciones geológicas entre ambos continentes son tan escasas que hasta los últimos tiempos de la historia de la Tierra formaron dos mundos aparte como Europa y África; hasta el momento que entran en contacto constituyen dos mundos

enteramente distintos separados por un mar central a modo de otro Mediterráneo, el Tetys de los geólogos. La repartición de las fauna y flora fósiles parece indicar que debemos buscar las relaciones de América del Sur allende los mares que bañan sus costas, hacia África por el Este y hacia Australia por el Oeste.

La misma simplicidad de líneas que acusa la forma externa de América del Sur se señala en el interior del país. Un primer vistazo al mapa orográfico delata inmediatamente las tres zonas fundamentales que se distinguen en el Continente Sudamericano: al Oeste, la *Cordillera Andina*, de curso Norte-Sur casi rectilíneo, excepto en sus extremos, en que aparece desviada hacia Oriente, la cual levanta sus cumbres de fuego y nieve por encima de los 7.000 metros de altitud; por el Este dos macizos de considerable extensión, pero de formas más suaves, los de las *Guayanas* y el *Brasil*, y entre ambos la amplia *depresión central de la Amazonia*, que empieza en el Orinoco y acaba en la Pampa Argentina y aparece cerrada completamente por el Oeste y por el Norte por el cinturón compacto de las montañas andinas, y abierto ampliamente hacia Levante por las llanuras que se abren entre los Andes y los macizos levantinos, portillones aprovechados por las grandes arterias fluviales de América del Sur: Orinoco, Amazonas y Paraná, a través de las cuales ganan el mar.

Contrasta esta distribución del relieve según franjas meridianas, con las regiones geográficas naturales, orientadas en sentido normal, de Este a Oeste; de la intersección de los dos factores primordiales del medio geográfico, clima y relieve, resulta la variadísima gama paisajística del Continente Sudamericano. El geólogo no puede olvidar este hecho geográfico esencial; de otra manera quizá no acertaría a explicar la variación que las formas del relieve experimentan a lo largo de cada una de las regiones naturales que de Norte a Sur se distinguen, desde la tupida selva virgen que rodea las latitudes ecuatoriales hasta las áridas y desérticas regiones del Perú, Bolivia y Norte de Chile.

### Historia geológica de América del Sur

En el mapa geológico de Sudamérica se percibe con claridad, si se clasifica cronológicamente el confuso

colorido indicatriz de las distintas categorías de terrenos, la misma ordenación apreciada por el geógrafo. En el centro del país, correspondiendo a la depresión central, predominan los manchones amarillentos que representan los terrenos geológicos recientes, terciarios y cuaternarios. Al Oeste y al Este de esta región las vivas tonalidades rojizas y verdosas señalan la preponderancia de terrenos primarios, secundarios y eruptivos en los macizos levantinos y en los Andes. Especialmente en las Guayanas y en el Brasil el desarrollo alcanzado por los depósitos más antiguos es considerable, mientras que en la Cordillera clarean las fajas verdosas de los terrenos mesozoicos. El estudio de la distribución y características de los terrenos geológicos nos servirá de base y de guía para conocer las vicisitudes por que han pasado las tierras americanas (Lám. II).

*Terrenos arcaicos.* — Sirve de base a las formaciones sedimentarias del continente, tanto en la Cordillera como en los macizos orientales, una potente formación estratocristalina constituida por neis, pizarras micáceas, cuarcitas y mármoles. Dichos terrenos alcanzan particular difusión en el macizo de las Guayanas y del Brasil, además de algunos retazos alargados en la Cordillera.

La ausencia de fósiles en las formaciones de tal naturaleza plantea siempre arduos problemas respecto a su posición cronológica, que sólo puede deducirse por sus relaciones con las demás formaciones sedimentarias próximas, pues sabido es que el hecho del metamorfismo nada indica acerca de la edad de los estratos.

Los afloramientos de los macizos atlánticos se prestan mejor al estudio, pues apenas han sido afectados por los plegamientos modernos. En los macizos de las Guayanas y del Brasil se distinguen dos series antiguas: una inferior, intensamente metamorfoseada, que sirve de base a otra superior, mucho menos transformada, la cual se inicia a partir de un conglomerado de base; esta formación pizarrosa superior alcanza gran extensión en el Brasil. Esta serie claramente sedimentaria suele ir debajo de los estratos fosilíferos del Cámbrico, con lo cual se deduce que aquellas dos formaciones geológicas deben ser atribuidas al Arcaico. La constancia de las rocas detríticas de elementos gruesos en la base de la serie superior permite señalar dos niveles estratigráficos: el

arcaico propiamente dicho, constituido por los terrenos intensamente metamorfoseados de la base, y las formaciones sedimentarias superiores, que pueden atribuirse al algonquino.

Difícil, por no decir casi imposible, resulta reconstruir la distribución de tierras y mares en estos antiguos tiempos de la historia geológica de la Tierra. Sin embargo, no es aventurado suponer que los conglomerados de base señalan la emergencia de macizos próximos que formarían parte del llamado Continente de Gondwana, que se extendía por el hemisferio Sur. La similitud entre los materiales africanos de esta época y los de América del Sur viene acreditada por las cuarcitas del algonquino de ambos continentes, en las cuales abundan los filones ferríferos y los embudos volcánicos diamantíferos.

*Terrenos primarios.* — Los terrenos paleozoicos son los elementos constitutivos esenciales de los macizos de las Guayanas y del Brasil; asimismo aparecen en la zona oriental de los Andes, especialmente al Oeste de la Pampa argentina y en los ejes de los plegamientos principales.

El terreno cámbrico se presenta claramente definido por la presencia de fósiles característicos (trilobites, braquiópodos) en las altiplanicies bolivianas y argentinas, a las cuales casi queda circunscrito. Esto indica, pues, que la mayor parte de los macizos atlánticos continúan emergidos en este período, pues falta en ellos la sedimentación marina.

El Silúrico se presenta un poco más difundido, pues no sólo se extiende en largos afloramientos según el eje de la Cordillera, sino que alcanza asimismo el macizo Brasileño, sumergido en parte. En el Silúrico inferior preponderan las pizarras con graptolites y las calizas y dolomías, las cuales acusan ya mares de cierta profundidad, aunque en la base alcanzan bastante desarrollo las cuarcitas depositadas en mares poco profundos. En el Silúrico superior se acentúa el régimen transgresivo, y en esta época, entre el macizo de las Guayanas y el del Brasil, queda ya individualizada una depresión que luego culminará con la formación del portillón que da salida al Amazonas.

Un régimen parecido continúa durante el Devónico y el Carbonífero, que permite la sedimentación concor-

dante de estos terrenos paleozoicos, pues aquí los movimientos orogénicos hercinianos tienen lugar un poco más tarde que en Europa. Lo demuestra el hecho de que el Carbonífero continental con plantas se encuentre escasamente desarrollado en los Andes chilenos, siendo de facies marina en el resto del país.

Con el final de la Era Primaria tienen lugar importantes trastornos que alteran completamente la configuración de Sudamérica. Los sedimentos continentales del Pérmico alcanzan extraordinario desarrollo en la superficie de los macizos huronianos y de los que se irguieron con las últimas manifestaciones orogénicas hercinianas. Sale a flor de agua la parte central de la Cordillera, y asimismo emergen en una gran extensión los macizos atlánticos. Las zonas montañosas quedan cubiertas desde un principio por potentes glaciares, cuyos depósitos morrénicos forman la base del Pérmico. Después se suceden depósitos continentales también, pero de distinta naturaleza, areniscas, conglomerados, arcillas, carbones, etc., entre los cuales se encuentran fósiles que permiten establecer importantes correlaciones con otros fragmentos del Continente de Gondwana, como, por ejemplo, la flora caracterizada por los *Glossopteris* y los reptiles del género *Mesosaurus*, exclusivos de África meridional y de América del Sur.

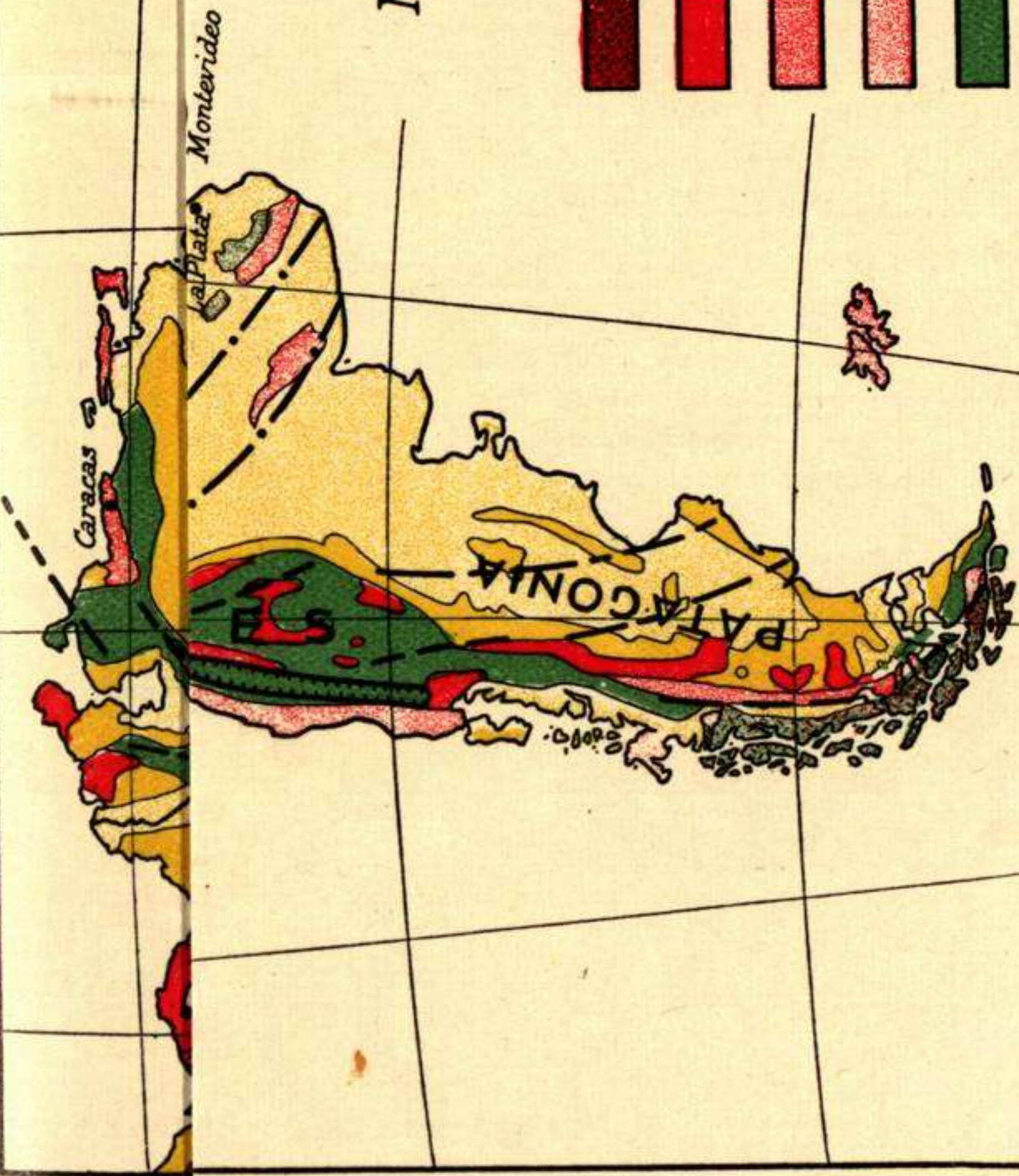
*Terrenos secundarios.*—Los terrenos secundarios dominan en otros ámbitos continentales que los primarios. En primer lugar, son, junto con las rocas eruptivas, el elemento esencial en la constitución de los Andes. En cambio, en los macizos orientales, sólo rara vez penetran las aguas marinas hasta su interior.












Al comenzar el Triásico continúan los movimientos orogénicos posthercinianos. En la cuenca del Paraná fluyen importantes efusiones de lavas básicas; el mar alcanza en su momento de transgresión álgida los bordes de estos campos ígneos. La mayor parte de la Cordillera queda recubierta por aguas somas, mientras en la parte meridional las plantas fósiles que se recogen en la Patagonia acusan la emergencia de este antiguo macizo.

El Jurásico y el Cretácico ocupan importantes extensiones en la Cordillera y en los bordes interiores de los macizos del Brasil y de las Guayanas. Casi toda la Cordillera queda convertida en un geosinclinal de regular

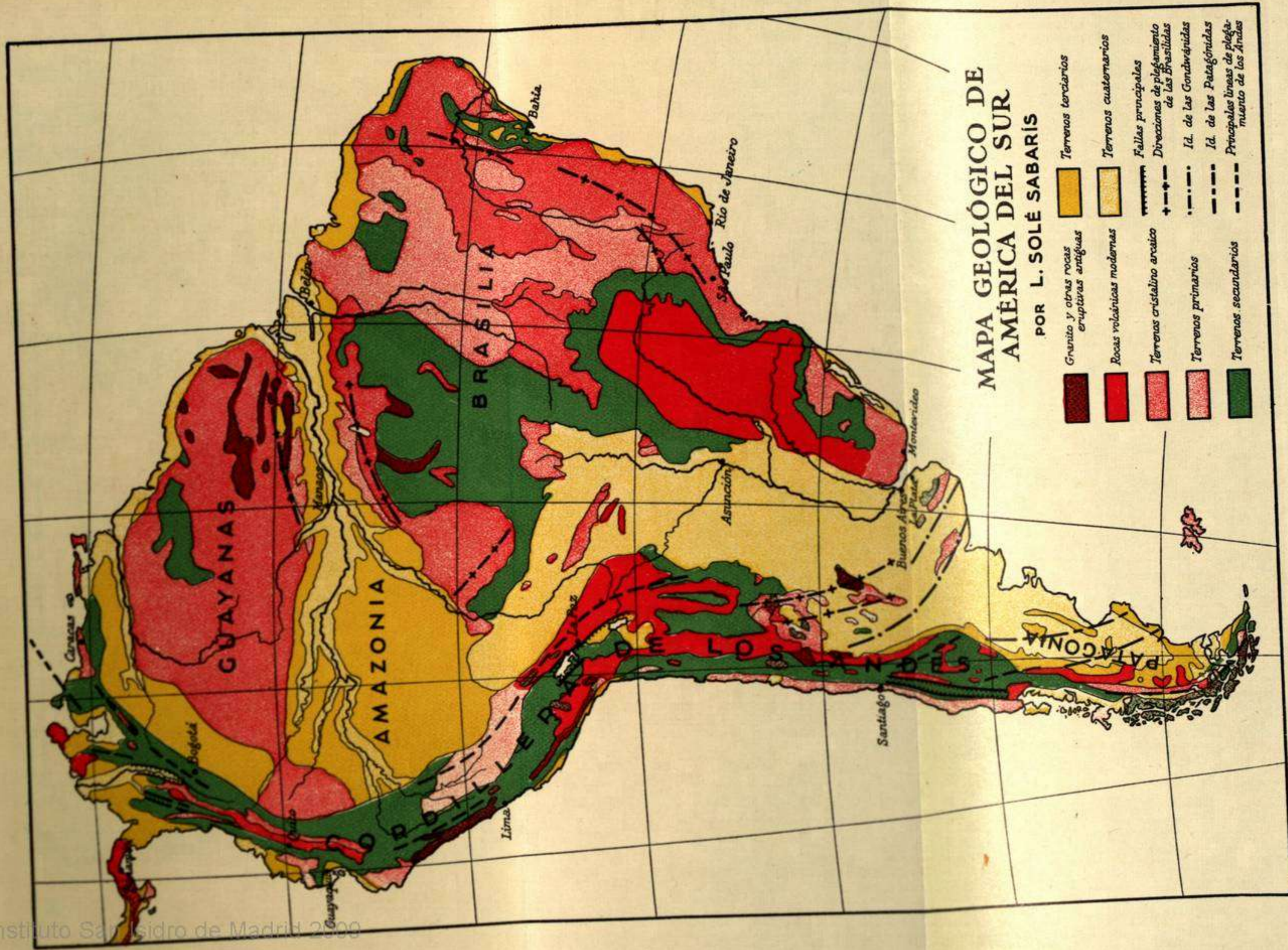
# MAPA GEOLÓGICO DE AMÉRICA DEL SUR

POR L. SOLÉ SABARIS



	Granito y otras rocas eruptivas antiguas		Terrenos terciarios
	Rocas volcánicas modernas		Terrenos cuaternarios
	Terrenos cristalino arcaico		Fallas principales
	Terrenos primarios		Direcciones de plegamiento de las Brasilidas
	Terrenos secundarios		Id. de las Gondwánidas
			Id. de las Patagónicas
			Principales líneas de plegamiento de los Andes





# MAPA GEOLÓGICO DE AMÉRICA DEL SUR

POR L. SOLÉ SABARIS

	Granito y otras rocas eruptivas antiguas		Terrenos terciarios
	Rocas volcánicas modernas		Terrenos cuaternarios
	Terrenos cristalino arcaico		Fallas principales
	Terrenos primarios		Direcciones de plegamiento de las Brasilidas
	Terrenos secundarios		Id. de las Gondwanidas
			Id. de las Patagónicas
			Principales líneas de plegamiento de los Andes

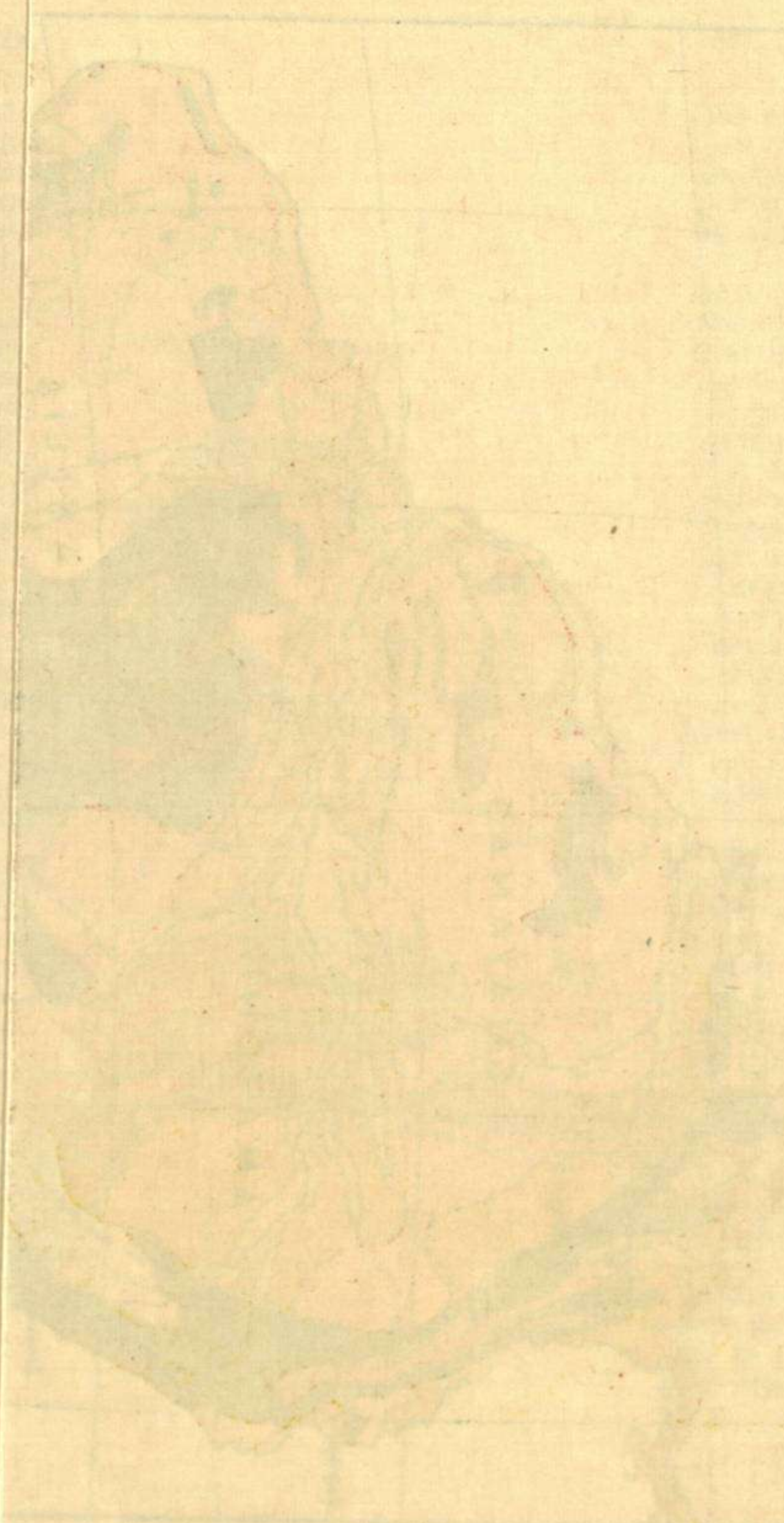




Fig. 92.—El período cretácico en América del Sur. El espacio punteado señala la extensión de los sedimentos continentales. La parte rayada la extensión de los mares en el cretácico (Gerth).

profundidad en el que se depositan calizas y margas. Durante el Jurásico este geosinclinal parte del Ecuador y llega al Falkland. En el Cretácico la transgresión es todavía más intensa. Además, importantes formaciones continentales de esta época recubren el macizo brasileño y buena parte de la Amazonia.

*Terrenos terciarios y cuaternarios.*—Con el principio del Terciario cambian radicalmente las cosas. Durante el Eoceno y el Oligoceno el mar empieza a retirarse a consecuencia de la emergencia andina que se inicia al principiar la Era; pero todavía la depresión amazónica se halla apenas esbozada.

Durante el Neogeno extensas sedimentaciones colmaron las depresiones del Orinoco, del Amazonas y de la Patagonia. Sólo faltan ya para completar el mapa geológico actual los mantos de loes y las arenas que con el régimen climático del Cuaternario se esparcen por toda la región central entre los 10 y los 50° de latitud Sur. Se forman los potentes deltas del Orinoco, Amazonas, Magdalena, y, al propio tiempo, los glaciares que se apoderan de las altas cumbres meridionales empiezan la labor modeladora que irá siendo completada por los restantes agentes erosivos.

### Formación de América del Sur

Se distinguen en Sudamérica tres elementos estructurales que han evolucionado de manera muy diferente y poseen rasgos completamente distintos:

a) Los macizos antiguos de las Guayanas, Brasil y Patagonia, constituidos por un núcleo inicial más o menos desarrollado originado por los plegamientos huronianos, al cual se han ido agregando los terrenos paleozoicos plegados a su vez al final de la Era Primaria; son los Hercínides que hemos distinguido en la Península Ibérica. b) La Cordillera andina, constituida también por un núcleo antiguo, pero que debe sus rasgos esenciales al gran paroxismo alpino; es el equivalente de los Alpides europeos. c) La depresión central, que comprende las planicies de la Amazonia, Chaco y Pampa, hundida a consecuencia de los plegamientos últimamente citados y colmatada por depósitos del terciario superior y cuaternario.

El papel tectónico de cada una de estas tres unidades

estructurales es muy diferente. Los macizos antiguos atlánticos han obrado, después de su constitución definitiva a consecuencia del paroxismo herciniano, como pilares resistentes que rara vez han sido sumergidos en las aguas oceánicas; contra ellos se han estrellado las olas orogénicas que en el transcurso de los tiempos han afectado las tierras colindantes. En cambio, la región andina ha sido mucho menos estable; iniciada como débil arruga montuosa por los mismos plegamientos que originaron las Sierras atlánticas, fué pronto alcanzada por el mar y durante casi todo el Secundario permaneció hundida formando un geosinclinal en el que se depositaron abundantes depósitos paleozoicos. Al final de la Era Secundaria y principio de la Terciaria el paroxismo alpino que afecta todos los bordes del Pacífico se hizo sentir también aquí con gran intensidad; los sedimentos mesozoicos del geosinclinal andino son estrujados contra las paredes rígidas del antepaís constituido por los macizos atlánticos, la Cordillera empieza a levantarse y, al propio tiempo, con los esfuerzos realizados se quiebra el gran macizo antiguo y parte de él se hunde para formar la depresión central de América del Sur.

Comparando ahora la estructura y el papel desempeñado por cada una de las unidades tectónicas sudamericanas con los plegamientos alpinos europeos, puede establecerse el siguiente paralelismo. El antepaís que en Europa aparece formado por los macizos hercinianos de Francia y Alemania (Macizo central francés, Vosgos, Selva Negra, Bohemia, etc.) aquí puede venir representado por los macizos de las Guayanas, Brasil y Patagonia. La fosa prealpina o prefosa que tanto por un lado como por otro bordea los arcos de plegamiento (depresión danubiana, depresión del Ebro, Aquitania, etc.) puede aquí venir representada por la depresión central de América del Sur. Finalmente, el plegamiento alpino correspondiente al fondo del geosinclinal correspondería a la cadena de los Andes.

Sin embargo, es de advertir que los sedimentos de los Andes no responden al fondo de un geosinclinal profundo como en los Alpes, sino que, por el contrario, muchos de ellos tienen carácter francamente nerítico o de escasa profundidad.

Examinemos ahora las estructuras y desarrollo de

cada elemento tectónico para poder apreciar las circunstancias de su formación.

### Brasílicas y Gondwánidas

Los macizos del Brasil, Guayana y Patagonia están constituidos esencialmente por rocas antiguas, arcaico-cristalino y pizarras y cuarcitas paleozoicas intensamente replegadas. Por encima de estos sedimentos antiguos que forma el zócalo del macizo y discordantes sobre él hay una débil cobertera de terrenos mesozoicos, predominantemente de facies continental, que sólo alcanza alguna importancia en los bordes de la zona occidental, en donde se inicia la depresión amazónica.

En el zócalo antiguo del Brasil y de las Guayanas preponderan las rocas arcaicas y algonquinas levantadas a consecuencia de los *plegamientos huronianos*. Estos macizos constituyen un primer núcleo que Keidel denomina las *Brasílicas*, al cual se irían adosando en el transcurso del tiempo otros terrenos más modernos. Estos núcleos formaron parte de un mismo plegamiento, pues en casi todos ellos domina la dirección Nornord-este de plegamiento.

Al final del Paleozoico y principio del Secundario las tierras emergidas aumentan considerablemente con los plegamientos hercinianos, que en el hemisferio Sur tienen lugar un poco más tarde que en el hemisferio Norte. Con estos plegamientos el macizo brasileño se ensancha considerablemente por el Norte, por el Sur y por el Oeste. Resto de esta época son las Sierras que en la provincia de Buenos Aires se yerguen en medio de la planicie de la Pampa y que sirven de término de enlace con el macizo de la Patagonia. Este último, durante algún tiempo, fué considerado como parte integrante de los Andes; pero el análisis de su estructura demuestra plenamente que se trata de un fragmento de los viejos macizos hercinianos incorporado y englobado posteriormente al plegamiento andino. Lo demuestra por lo menos la flexión acentuada que la punta meridional de los Alpes describe alrededor del zócalo antiguo de la Patagonia.

Siguiendo la nomenclatura de Keidel, estas tierras que emergieron al final del Paleozoico y que constitu-

yeron un gran continente en el hemisferio Sur, pueden designarse por *Gondwánidas*.

### Los Andes

Las formas vigorosas de la Cordillera andina anuncian claramente que se trata de una Sierra de formación reciente, la cual forma parte del gran cinturón montañoso que rodea el Pacífico y que por analogía con el círculo mediterráneo recibe el nombre de Alpidés.

Queda aún mucho por precisar respecto a la estructura de los Andes, época de formación, etc. Sin embargo, los distintos cortes geológicos que se han publicado permiten suponer que se trata de pliegues sencillos desarrollados en el mismo geosinclinal mesozoico en que se depositaron los estratos; es decir, se trata de una cordillera autóctona en la que no se han encontrado trazas de corrimientos de importancia ni de mantos de recubrimiento. En todo caso se trata simplemente de fallas que producen cobijaduras sin importancia o de valor puramente local.

Además, algunos dispositivos estructurales de la región Norte de los Andes, como en Colombia y en el Ecuador, en donde la Cordillera se descompone en una serie de cadenas paralelas, cada una de las cuales es un *horst* que sobresale entre fosas de hundimiento (valle del Magdalena, etc.), parecen indicar la proximidad en profundidad del zócalo paleozoico rígido y fracturado a consecuencia de los plegamientos alpinos.

Otro problema que se plantea es el de la época de formación de los Andes. A juzgar por los estudios hasta ahora realizados, es indudable que el plegamiento alpino empieza en Sudamérica al finalizar el cretácico; por lo tanto, es bastante anterior a la época de plegamiento de los Alpes y aun del Pirineo. El paroxismo debió de continuar durante buena parte del Paleogeno o Terciario inferior, pues éste se halla plegado, como el Cretácico, en el Perú. Es de presumir que en el período Mioceno la Cordillera estaba ya completamente formada, por lo menos en su mayor parte, pues faltan en su interior toda suerte de formaciones marinas de esta época, y, además, las que se extienden por los bordes

apenas han sido alteradas en su horizontalidad primitiva.

Como manifestaciones finales de los paroxismos alpinos deben incluirse la formación de la depresión amazónica, ya iniciada en el Cretácico, y la emergencia del istmo de América Central a través de la fosa mediterránea que en los períodos geológicos anteriores separó las dos Américas. Por este puente pueden pasar después del Mioceno las primeras bandas de animales emigrantes y desde entonces las mismas faunas se extienden en ambos continentes. También corresponde a las manifestaciones orogénicas póstumas el inusitado desarrollo de las regiones volcánicas que bordean el Pacífico.

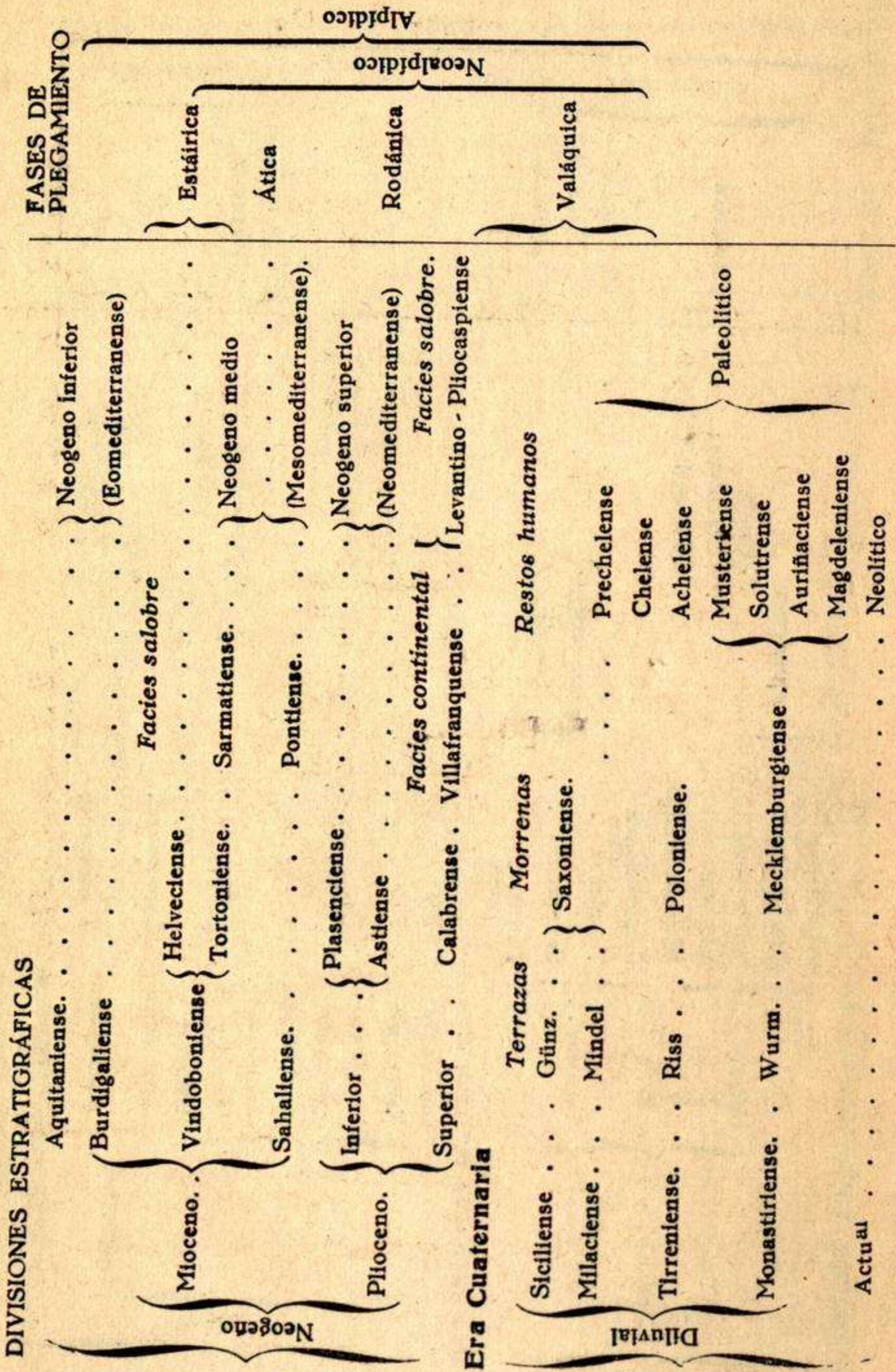


# CUADRO SINÓPTICO DE LOS TERRENOS SEDIMENTARIOS

DIVISIONES ESTRATIGRÁFICAS	FASES DE PLEGAMIENTO
<b>Era Arcaica o Agnostozoica</b>	
Arcaico (Azoico) . . . . .	Eosueco-fenídica o Lauréntica . . . . .
Algonkino (Proterozoico, Arqueozoico) . . . . .	Neosueco-fenídica o Lauréntica
Inferior . . . . .	Paleoalgonkina. { Carélida o Kilórnico
Superior. . . . .	Neoalgonkina. { Brasílica Laurásica
<b>Era Primaria o Paleozoica</b>	
Cámbrico. . . . .	
Georgiense	
Acadiense	
Postdamiense	
Silúrico . . . . .	
Ordoviciense. . . . .	Taconica
Tremadoc	
Arenig (Skiddavlen) { Valenciense	
Llandilo	
Caradoc	
Asghillense	
Taranon	
Llandovery	
Wenlock { Salopiense	
Ludlow { Downton	
Gediniense	
Coblenciense	
Eifeliense	
Givetiense	
Frasniense	
Fameniense	
Devónico . . . . .	Ardénica
Inferior . . . . .	Érica
Medio . . . . .	
Superior . . . . .	
Facies marina	
Facies continental	
Dinanciense - Culm . . . . .	
Moscoviense - Westfaliense	
Uraliense - Estefaniense. . . . .	
Autuniense. { Rotliegende	
(Artinskiense) {	
Saxoniense. {	
Turingiense : Zechstein . . . . .	
<b>Antarcollítico</b>	
Carbonífero . . . . .	Bretónica
Pérmico. . . . .	Sudética Astúrica Saállica Pfázica
	Varisco o Herciniano







# ÍNDICE

---

PRÓLOGO ... ..	7
INTRODUCCIÓN ... ..	11
I. — GEOFÍSICA. Constitución de la Tierra ...	19
II. — MATERIALES DE LA CORTEZA. Sedi- mentación ... ..	24
III. — GEOLOGÍA DINÁMICA. La Vida de la Tierra ... ..	35
IV. — MOVIMIENTOS DE LA CORTEZA. La ac- tividad del interior de la Tierra ...	42
V. — GÉNESIS DE LAS MONTAÑAS ... ..	57
VI. — VOLCANES ... ..	88
VII. — TERREMOTOS ... ..	102
VIII. — ACCIÓN DE LA INTEMPERIE. II Acti- vidad exterior de la Tierra ... ..	114
IX. — ACCIÓN GEOLÓGICA DEL VIENTO ...	125
X. — ACCIÓN GEOLÓGICA DEL AGUA ... ..	135
XI. — ACCIÓN GEOLÓGICA DEL HIELO ... ..	157
XII. — ACCIÓN GEOLÓGICA DEL MAR ... ..	171
XIII. — ACCIÓN GEOLÓGICA DE LOS SERES VIVOS ... ..	182
XIV. — GEOLOGÍA DE LA HISTORIA ... ..	194
XV. — ERA ARCAICA O AGNOSTOZOICA ... ..	202
XVI. — ERA PRIMARIA. EDAD DE LOS TRILO- BITES ... ..	207
XVII. — ERA SECUNDARIA. EDAD DE LOS REP- TILES ... ..	217
XVIII. — ERA TERCIARIA. EDAD DE LOS MAMÍ- FEROS ... ..	228
XIX. — ERA CUATERNARIA. EDAD DEL HOM- BRE ... ..	236
XX. — LA VIDA EN EL PASADO GEOLÓGICO.	242
APÉNDICE ... ..	265
CUADROS SINÓPTICOS ... ..	301





EDITORIAL



APOLO



EDITORIAL



APOLO



Manuale  
de  
Inicielor  
"APOLLO"

Sole Saberes  
INTRODUCCION  
a la  
GEOLOGIA

---

