

A la Escuela Superior de Veterinaria
de Córdoba, con todo respeto,

Juan Carandell

III-36

HIPOTESIS GEOTECTONICAS

JUNTA PARA AMPLIACION DE ESTUDIOS
E INVESTIGACIONES CIENTIFICAS

HIPOTESIS GEOTECTONICAS

POR

FEDERICO NÖLKE

DE BREMEN

TRADUCCIÓN DE

JUAN CARANDELL

FACULTAD DE VETERINARIA DE CORDOBA
BIBLIOTECA

Número de orden 7828

Estante núm. _____

Tabla núm. _____

Número _____

MADRID

1935

BREVES PALABRAS DEL TRADUCTOR

Allá en un pintoresco rincón de Andalucía, Cádiz, donde durante diez años hubo de regentar el que suscribe la cátedra de Historia Natural del Instituto de Aguilar y Esclava, se impuso el deber, del cual no ha desviado, de procurar no aislarse de la circulación universal de las ideas, como consecuencia de sumergirse demasiado en la pequeña circulación propia de toda vida local, máxime cuando ésta es reducida. Y así, a través de dos o tres revistas científicas internacionales, no corrió durante aquella difícil prueba el peligro de quedarse "retrasado" en demasía; por lo menos, se pusieron personalmente los medios, toda vez que la vida provincial española no suele ofrecerlos de una manera oficial—Estado, Diputación, Municipio—, como ya hoy día los deparan dos o tres grandes capitales. La lectura de tal o cual nota crítica, el anuncio de una obra, inducía al traductor de la presente a hacer un esfuerzo pecuniario y adquirirla; esto le proporcionó más de una desilusión; pero también ha dado motivo a profundas satisfacciones espirituales, pues además del conocimiento directo de materiales extranjeros, ha podido llegar al trato personal con algunos autores a través de copiosa e interesante correspondencia, que llegaba o salía de aquella microscópica ciudad. Y una de esas obras, merecedoras de di-

rulgación en nuestro idioma, es "Geotektonische Hypothesen", del profesor Friedrich Nölke, de Bremen, bien destacado en la abundante bibliografía geológica y geofísica y ya conocido en España. Aquí, donde la poca cantidad de intelectuales dedicados al cultivo de las ciencias puras en general, y de las geofísicas y geológicas en particular, obliga a redoblar el personal esfuerzo, para labrar a la vez varias parcelas a fin de hacer lo posible por presentarnos ante el mundo con un acervo, si reducido, lo más completo posible, aquí, decimos, no faltan ni han faltado pensadores, filósofos de la Geología que han buccado en las tinieblas que rodean a la causalidad de los fenómenos creadores de las montañas, y cuyas ideas, a veces firmemente documentadas, fueron expuestas en la Sociedad Española de Historia Natural o en algún Congreso de la Asociación Española para el Progreso de las Ciencias; es de justicia consignar siquiera el nombre de don Federico de Chaves y Pérez del Pulgar, de Córdoba.

No deja de tener tampoco especial oportunidad la publicación de la obra del doctor Nölke en español, después de haber merecido igual dignidad, si bien a través de un cerebro y una pluma tan doctas como los de don Vicente Inglada Ors, ilustre sismólogo, la resonante obra de Alberto Wegener acerca de "La génesis de los Continentes y de los Océanos". Porque, en efecto, Nölke, también apoyado sobre rigurosísima dialéctica, cuyas bases se ahondan en los cálculos físico-matemáticos, hace una serena disección de los postulados y conclusiones tectogenéticas, llegando a imbuir en el ánimo del lector la duda... Y, con toda valentía, sin temer para nada a 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

deslambreadora 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 pareciera autienada; con bien templada reja vuelve a labrarlo, y ahondando, ahondando, halla preciados tesoros.

Y el lector, otra vez, vuelve a dudar...

*

* *

Después de estas líneas, cúmpleme tan sólo unas palabras de gratitud. Gratitud a los señores don Ignacio y don Cándido Bolívar, y don José Royo y don Joaquín Gómez de Larena. Al primero—gloria legítima de España—, por haber apadrinado esta traducción modesta ante la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas; a los tres señores restantes, por haber animado y auxiliado en la tarea al que suscribe.

El doctor Nölke, mi amigo dilecto, ha tenido la gentileza de facilitarme la "puesta al día" de la edición original alemana. Vaya hacia el insigne profesor de Bremen mi cordial reconocimiento.

JUAN CARANDELL

Córdoba, noviembre de 1935.

P R O L O G O

El problema orogénico es, sin duda, no ya el más importante, sino el más difícil de toda la Geología. Fácilmente se comprende, en términos generales, cuáles son las actividades que alteran y destruyen las grandes formas tectónicas de la superficie terrestre. Pero cuáles hayan sido las fuerzas que dieron origen a estas formas es algo cuya observación está vedada a la Humanidad, que no cuenta de vida más que unos momentos con respecto a la historia de nuestro planeta. Mas el espíritu se ha esforzado en hallar una explicación. Han sido ideadas innumerables hipótesis, las cuales procuran bucear en la marcha de la evolución. Todas se construyen sobre un grupo de hechos de observación determinados; todas invocan el apoyo de postulados físicos indubitables, y todas parecen alcanzar el objetivo propuesto. Y, sin embargo, no pueden sustituirse mutuamente. ¿Es posible encontrar entre ellas la hipótesis que, apoyándose sobre más firmes bases físicas, concuerde mejor que ninguna con los hechos observados? El presente trabajo constituye un ensayo hecho en este sentido.

Nuestro propósito es examinar las diferentes investigaciones orientadas hacia la explicación de los hechos, y hacer su crítica para fijar la que mejor aparezca cristalizada a la vista de éstos.

Se ha dudado de si de una discusión crítica de las hipótesis geotectónicas había que aguardar un resultado positivo, toda vez que las bases de tal polémica no son firmes, y, en último término, la crítica permanece dentro de un marco cuyos límites son el pró o el contra acerca de una cierta verosimilitud, la cual se presenta en las diversas mentes de una manera también distinta (¹).

Pero si, en realidad, no existiese ninguna probabilidad de que obtuviésemos un resultado positivo a la postre de una discusión acerca de la posibilidad o imposibilidad físicas de ciertas hipótesis: si no hubiese el propósito de trazarse un cuadro objetivo, la Geología teórica no sería ninguna ciencia, sino tan sólo un maremagnum de conjeturas y opiniones. Ciertamente, no se debe discutir si unos u otros argumentos tienen más importancia para unos autores y menos para otros. Pero cuando un autor acepta unos y rechaza otros es porque su punto de vista obedece a razones fundamentales y cuyo valor cotiza. De esta manera se arroja, a su vez, nueva luz sobre el caso. Cuantas más facetas tiene, empero, el punto de vista; cuando mejor permite considerar un problema, más se desvanecen las sombras en que éste aparecía envuelto al principio, y más inminente se presenta la consecución del fin perseguido. No nos jactamos de haber logrado nuestro propósito, pero creemos que nuestro ensayo deja juzgar acerca del camino a seguir para alcanzar dicho fin.

Para dar forma adecuada al juicio crítico hemos expuesto en sus rasgos más sumarios los hechos de observación geológica sobre los cuales se han constituido las hipótesis, o a cuya explicación tienden éstas. Después de esta primera parte de nuestro libro echamos una

¹ R. SOXEN, Die erdgegeschichtlichen Diastrophismen im Lichte der Kontraktionslehre (Los diastrofismos a través de la historia de la Tierra desde el punto de vista de la contracción). *Geol. Rundsch.* 13 Bd. 1922, p. 365.

ojada sobre las hipótesis y sobre los argumentos que les dan sustentación científica, así como el punto de vista en que los autores se sitúan para invocarlos. Cuando nuestras observaciones se apoyan sobre trabajos precedentes de otros investigadores acudimos a la cita oportuna para autorizarlas.

FEDERICO NÖLKE

HIPOTESIS GEOTECTONICAS

INTRODUCCION

Con el incremento que todos los campos de la Ciencia adquirieron en el siglo XVIII creció también el interés hacia un asunto que en los tiempos precedentes había permanecido totalmente ajeno al círculo espiritual de la Humanidad. El mundo de las plantas y el reino animal habían ya sido objeto de observación y de investigación en épocas remotas, en la antigüedad griega. Pero el mundo de lo inorgánico, que a lo largo de los siglos hubo de ser soslayado o, a lo más, considerado desde puntos de vista puramente teóricos, de divagaciones cosmogónico-filosóficas, hasta ese momento no entró en el dominio fundamentalmente científico.

Hasta bien entrado el siglo XVII persisten las ideas propias del medioevo a cual más aventurada y fantástica; a fines de este siglo el médico N. Steno formula las primeras reflexiones acertadas y felices sobre algunos problemas geológicos (la formación de las rocas sedimentarias y de las montañas y valles). De mayor vuelo fueron las investigaciones del abate A. Kircher.

En efecto, apoyándose sobre materiales de observación preñados de defectos, que le impedían seguir con seguridad el camino de conocer las grandes síntesis, logró este autor establecer racionalmente el origen de algunos fenómenos aislados. Pero las primeras conclusiones científicas de valor indudable arrancan de A. Werner, quien, como profesor en la Academia de Minas de Freiberg, había adquirido ideas fundamentales acerca de la estructura de las montañas y de los yacimientos metálicos. Fué él quien, concretándose especialmente a la observación de los estratos sedimentarios, construyó el Neptunismo, la teoría en virtud de la cual las rocas debían haberse formado como precipitación o depósito en las aguas. Uno de sus más decididos entusiastas era Goethe. Los neptunistas cayeron en el error de aplicar su principio de una manera inflexible. No pararon mientes en que no todas las rocas podían tener el origen por ellos invocado. Sus destructores, los plutonistas, entre los cuales no sólo se contaban los fundadores de esta doctrina, J. Hutton y J. Playfair, sino además A. de Humboldt y L. de Buch, entre otros, ensalzaron la importancia del Volcanismo, cayendo también en el mismo defecto de intransigencia doctrinal que habían censurado a los neptunistas¹. Sin embargo, la investigación hizo nuevos avances, y final-

¹ La rivalidad entre Neptunistas y Plutonistas, cuyo ropaje poético lo hallamos en la clásica noche de Walpurgis del «Fausto», fué pródiga en frutos. Produce sorpresa el que un espíritu tan libre de prejuicios como Goethe pudiera aferrarse formalmente a la idea de que el basalto fuese de origen acuático. También la idea de que las capas sedimentarias inclinadas no obedezcan a acciones volcánicas dislocadoras, sino a los esfuerzos de las rocas próximas (*Geologische Probleme und Versuch ihrer Auflösung*, I. Abschnitt: «Problemas geológicos y ensayo de su solución», I.^a parte), halla sus dificultades en las explicaciones neptunistas. Parece que él más bien quería establecer con sus ideas una concatenación, cuando se familiarizaba con la «maldita leonera del Creador del mundo».

mente vióse que ni el Neptunismo ni el Plutonismo solos detentaban la verdad, sino que el término medio, una asociación de los dos principios, desentrañaría mejor la multiplicidad de los hechos.

G. Cuvier, más paleontólogo que geólogo, estableció su teoría de los cataclismos, como consecuencia de la desaparición de muchos géneros de animales antiguos. Revoluciones gigantescas, acaecidas en el interior de la tierra, según él, habrían repercutido en la superficie del globo y ocasionado el aniquilamiento de todo cuanto alentaba vida. Después se iniciaría una nueva creación, la cual, a su vez, sería pasto de una nueva catástrofe, y este ciclo se repetiría varias veces. La teoría catastrófica de Cuvier, teoría que peca de exclusivismo, halló no pocas réplicas. Ch. Lyell, que se dedicaba especialmente a estudiar los fenómenos que todavía en la actualidad transforman la superficie terrestre, manifestó, frente a Cuvier, que en el pasado actuaron los mismos fenómenos y con análoga intensidad que hoy día, abarcando grandes períodos de acciones que lentamente dan origen a las formas de la superficie terrestre, o que destruyen las preexistentes, pero sin hallar rastro de acontecimientos de carácter catastrófico. Esta teoría del «actualismo» alcanzó la popularidad en la segunda mitad del siglo XIX. Hoy se reconoce también a la doctrina catastrófica de Cuvier un cierto fondo de verdad, así como se restringe el carácter absoluto que al actualismo se atribuía.

Uno de los resultados definitivos de las investigaciones recientes es el conocimiento que tenemos de la sucesión alternante de los períodos orogénicos y anorogénicos. En los tiempos de anorogénesis las actividades tectónicas parecen dormir, para despertar con brío en los períodos orogénicos. ¿Dónde está el origen de estas fuerzas, dónde radican? ¿De qué naturaleza son? Creyeron los plutonistas que fueran de carácter volcánico. Esta

creencia se revela, empero, como insuficiente. Uno de los primeros y más fervientes líderes del plutonismo, E. de Beaumont, abandonó la hipótesis en sus últimos escritos y la sustituyó por la teoría de la contracción¹, en cuya virtud la Tierra, a consecuencia del enfriamiento, se arrugaría, originándose en la corteza, cada vez más gruesa, fuerzas tangenciales, sin cesar renovadas. Esta doctrina ha ido predominando más y más en la Ciencia, sobre todo en manos de E. Suess, que la explana y aplica en su famosa obra *Das Antlitz der Erde*. Sin embargo, los tiempos más recientes han traído algunos nuevos hechos de observación que parecen contradecir tal teoría. Diversos investigadores se han dedicado, en su vista, a sustituirla por otras. Ninguna, empero, ha logrado destruir la hipótesis de la contracción. Hoy día todo es inseguridad y confusión, y por todas partes se agita la lucha entre las diversas tendencias. El objeto de las páginas que siguen es buscar algunas aclaraciones a todas ellas².

¹ Puede considerarse a R. Descartes como padre de la teoría de la contracción. E. de Beaumont, junto con J. Dana, dióle bases más científicas y mayores vuelos.

² E. Tams presenta un interesantísimo compendio de las distintas hipótesis (*Einführung in die Geophysik* (Introducción a la Geofísica, de A. Prey, C. Mainka, E. Tams; Berlin, 1922). La obra es de otro carácter que la nuestra. Más bien se busca en ella la explicación de los fundamentos de una dinámica endógena de la corteza terrestre, en lugar de presentar, en un cuadro sinóptico, una exposición crítica de las hipótesis geotectónicas. Sobre éstas la obra en cuestión sólo hace comentarios circunstanciales.

HECHOS DE OBSERVACION Y SUS CONSECUENCIAS TEORICAS

El asunto de la Geología es la investigación de la estructura y del desarrollo de la corteza terrestre. Como quiera que la corteza terrestre no es más que una porción, y su desarrollo un supuesto de la historia evolutiva de toda la Tierra, los problemas geológicos no son otra cosa que fragmentos de problemas más generales. Por consiguiente, no pueden ser tratados hasta el agotamiento, si tenemos que circunscribirnos forzosamente a esbozarlos. Si se quiere ahondar en ellos de una manera racional es preciso alinearlos junto con los problemas de carácter general. Sólo cuando la mirada abarca la totalidad se evita el riesgo de considerar lo individual desde un ángulo falso.

Las fuerzas que dirigen el desarrollo de la corteza terrestre no han de pertenecer forzosamente a la corteza misma. Pueden tener su asiento también fuera de la Tierra o en el interior de ésta. Las mareas solar y lunar son fuerzas extratélúricas, las fuerzas intratélúricas

escapan a la verificación directa, y por esto permanecen más o menos problemáticas, pues la disposición del interior de la Tierra sólo se revela en virtud de la observación de los fenómenos geológicos, o también, por caminos más teóricos, como resultado de las investigaciones astronómicas, puesto que la Tierra es cuerpo celeste sometido a influencias cósmicas, y el proceso evolutivo que como planeta haya experimentado ha tenido por consecuencia el estado actual en que se halla.

Las hipótesis geotectónicas construyen relaciones de causalidad con los hechos geotectónicos. Por la valoración de su capacidad científica se llega a ver si sus fundamentos teóricos están libres de discusión o si están en contradicción con otras disciplinas científicas. El juicio crítico ha de abarcar, por consiguiente, todo el material de observación cuya comprensión se proponen desentrañar las hipótesis (§§ 1-6, Disposición del interior de la Tierra, Continentes y Océanos, el Principio isostático, los Geosinclinales, Períodos orogénicos y epirogénicos). Después hay que buscar si las funciones físicas atribuidas a las energías geotectónicas tienen autenticidad (§§ 7-9, Desplazamientos de la corteza, Migraciones de los polos, Períodos glaciares), y, finalmente, es preciso consignar algunas explicaciones astronómicas acerca de la marcha evolutiva del cuerpo celeste para totalizar y reunir mejor los aspectos parciales de la exposición (§ 10, 32, Problemas cosmogónicos).

§ 1

Estructura interior de la Tierra

La densidad media de la Tierra es 5,5; la densidad media de las capas terrestres superficiales no pasa, empero, de 2,7. De lo cual se infiere que la densidad de la porción central rebasa el valor 5,5.

Dos explicaciones se dan para la gran densidad del interior de la Tierra. O bien se invoca el hecho de que la presión aumenta hacia el centro, en donde alcanza unos tres millones de atmósferas, o se supone la existencia de materiales de distinta naturaleza. Una explicación no excluye a la otra; verosímelmente, ambas tienen algún fundamento.

Que la Tierra se compone de materias de naturaleza diversa lo demuestran las observaciones acerca de las velocidades de propagación y amplitudes de las ondas sísmicas. Velocidad y amplitud varían, no en relación con el ángulo que las ondas forman con la superficie terrestre, sino que, según determinados valores angulares, experimentan una variación súbita. De lo cual cabe deducir una discontinuidad de la distribución de las masas en el interior de la Tierra y, al propio tiempo, una superposición concéntrica en las masas de igual peso específico.

De las observaciones sísmicas se deduce que la superficie de discontinuidad más profunda tiene un radio de 3.500 km. Constituye una masa nuclear, cuya densidad alcanza un valor aproximado de 9,2. Es general la suposición de que se compone de hierro, en aleación con níquel y cobalto. La densidad media del hierro es 7,8; la del níquel y cobalto, 8,8 y 8,9. La densidad algo mayor del núcleo se atribuye a las extraordinarias presiones a que se halla sometido.

Sobre el núcleo descansa una capa intermedia, cuya densidad es 6, la cual se diferencia profundamente de las capas nucleares inmediatas infrayacentes, al propio tiempo que está constituida por algunas capas concéntricas de estructura física variable entre sí. Según algunos geofísicos, está constituida por hierro metálico; según otros, por masas siderolíticas y condriticas.

La capa intermedia está incluida dentro del caparazón que constituye el manto de rocas de la Tierra, y

cuyo espesor es de 1.700 km. Lo constituyen masas magmáticas de una densidad media de 3,4, que llegan hasta las inmediaciones de la superficie terrestre y que son continuamente alteradas bajo la acción de la atmósfera y la hidrosfera. Los productos de alteración dan origen a las rocas sedimentarias, las cuales envuelven al magma a guisa de una delgada película.

La temperatura aumenta hacia el centro de la Tierra a razón de 3° por cada 100 metros de profundidad en las capas más exteriores. Circunstancialmente este gradiente es menor; otras veces, algo mayor. Al llegar al centro de la Tierra permanecería constante y alcanzaría un valor de 200.000° C. Se admite generalmente que el aumento de temperatura con el progresivo alejamiento de la superficie va efectuándose de una manera más lenta, y que todo el núcleo terrestre tiene una temperatura homogénea de algunos miles de grados tan sólo (véase § 24).

Acercas de la estructura física de las materias del interior de la Tierra sólo suposiciones cabe aventurar. Del carácter de las vibraciones sísmicas, las cuales, en parte, se propagan a través del interior de la Tierra como ondas transversales, y del carácter de las deformaciones de marea, que, en contraste con la resonancia de las masas líquidas, sólo se traducen en una levísima respuesta en la masa de la Tierra, dedúcese que nuestro planeta, bajo la influencia fugaz o la acción periódica de las energías actuantes, se comporta, en su totalidad, como un cuerpo elástico, cuya rigidez es dos o tres veces mayor que la del acero. De eso no se infiera, sin embargo, que cuando las fuerzas que actúan son duraderas la Tierra deje de tener en conjunto una fluidez más o menos apreciable. Su aplanamiento es el mismo que hubo adquirido la Tierra cuando se hallaba en estado fluido, a consecuencia de la velocidad de rotación.

Escapa a nuestro conocimiento el saber de qué ma-

nera las elevadas presiones y las extraordinarias temperaturas del interior de la Tierra influyen en el estado de agregación de la materia. Posible es que las masas se refinan allí con un aspecto de sustancia rígida o sólida y flúida al propio tiempo.

§ 2

Continentes y océanos

Estableciendo la relación entre la altitud media de todas las regiones de la superficie terrestre y la superficie del océano se deduce que el 27 por 100 de las mismas está al nivel entre -200 y $+1.000$ m., y el 22 por 100 a un nivel entre -4.000 y -5.000 m. Además, hay un $15 \frac{1}{2}$ por 100 entre -3.000 y -4.000 m., y 13 por 100 entre -5.000 y -6.000 m. Sólo una porción, relativamente menor, de la superficie de la Tierra pertenece a los niveles superiores, a pesar de que los límites de estos niveles están considerablemente más separados entre sí. Al nivel entre 1.000 y 9.000 m. pertenece el 8 por 100; al nivel de -200 a -4.000 m., el $13 \frac{1}{2}$ por 100, y al de -6.000 a -10.000 m., el 1 por 100. Cabe, pues, establecer una división de la superficie del globo en dos terrazas: una que está, aproximadamente, unos 4.500 m. más alta que la otra, separadas por un pronunciado escalón. La terraza inferior, cubierta por las masas oceánicas, constituye la tabla submarina profunda. La meseta superior no es continua, sino que forma zócalos aislados. Estos surgen sobre el nivel del mar, y son los continentes; no obstante, están circundados por una zona plana a una profundidad de algunos centenares de metros bajo el nivel del océano. En las regiones continentales, sobre la terraza continental levántanse, en zonas reducidas, las mesetas

y las cordilleras, así como en zonas limitadas de la tabla submarina profunda húndese ésta en forma de abismos algunos millares de metros más profunda.

Los grandes rasgos morfológicos terrestres que acabamos de bosquejar producen la impresión de que los continentes son entidades definidas, bloques o masas que, análogamente a los hielos flotantes en el agua, se levantan sobre la tabla submarina profunda por ser su densidad menor que la de todo cuanto las rodea.

§ 3

El principio isostático

La densidad media de las rocas constitutivas de los continentes es 2,7, y algo más de 1 tan sólo la del agua del mar. Los continentes tienen, pues, un exceso de masa con respecto a las cuencas oceánicas. Cabría esperar, por tanto, un valor de la gravedad más elevado en las zonas continentales que en las marinas. Sin embargo, con excepción de leves diferencias locales, la gravedad es la misma en todas partes. De ahí se infiere que los excesos de masa visible están compensados por defectos de masa invisible, y que los defectos de masa accesible a nuestra observación están neutralizados por excesos de masa oculta. Los defectos de masa pueden resultar de espacios subterráneos vacíos. Pero esta explicación no puede aplicarse, sin embargo, a los excesos de masas continentales compensados por defectos de igual valor, puesto que la solidez que a las rocas da la presión no basta para evitar el que las cavidades, cuyas dimensiones corresponden a las de los zócalos continentales, se hundan. Todavía quedan otras dos posibilidades. O bien las rocas que constituyen los zócalos continentales y los fondos oceánicos, o su subsuelo profundo,

son de distinta naturaleza, o son distintas entre sí a causa de su estado físico diferente, a pesar de que su composición fuese idéntica. Pratt, fundador de la teoría de la Isostasia, abunda en el último criterio. Según él, las rocas de los continentes son menos densas que las de los fondos oceánicos, cuyas aguas frías, en inmediato contacto con ellas, han aminorado su temperatura. Sin embargo, la mayoría de los geólogos se han pronunciado en favor de la primera hipótesis, pues dichas diferencias de temperatura no son lo suficientes para explicar aquella gran diferencia, siendo cierto, por otra parte, el contraste de densidades en las rocas¹.

La corteza terrestre está constituida especialmente por rocas cristalinas; los sedimentos de neoformación, procedentes de los productos de alteración de aquéllas, sólo tienen importancia local. Las rocas cristalinas se agrupan en dos series. En un grupo predominan los elementos Silicio y Aluminio; en el otro, el Silicio y el Magnesio. El conjunto de las primeras rocas recibió de Sness el nombre de Sial, y el de las segundas, el de Sima; el representante por antonomasia del Sial es el Granito, y el del Sima, el Basalto. Las rocas ácidas siálicas tienen una densidad algo menor que las básicas del Sima; por esto las primeras predominan en la superficie de la Tierra, mientras que el Sima abunda en las grandes profundidades.

¹ W. Deecke opina que la distinta densidad del fondo oceánico y los continentes es atribuible al conjunto de presiones que los fondos oceánicos hubieron desarrollado al hundirse (*Neues Jahrb. für Miner., Geol. u. Pal.*, 1906, Beilageband, 22). Pero a la gran diferencia entre las tablas continental y suboceánica corresponde una diferencia de presión a lo sumo de 1.200 kg. por centímetro cuadrado, y esta presión sólo es capaz de reducir en una 400 ó 800ava parte lineal a las rocas. (Módulo de elasticidad de las rocas cristalinas, 5.000 a 10.000 kg. por centímetro cuadrado). El aumento de densidad producido por la presión no sería más de $\frac{1}{8}$ a $\frac{1}{4}$ %. La verdadera diferencia es, empero, por lo menos, diez veces mayor.

Si la temperatura en la corteza superficial de la Tierra crece, aproximadamente, a razón de 3° por cada 100⁰ de profundidad, a 30-50 km. ha de alcanzar valores tales que las rocas, consideradas bajo circunstancias normales, comienzan a fluidificarse. La extraordinaria presión reinante en estas profundidades contrarresta, sin duda, dicha fluidez; de todos modos, es opinión generalmente admitida que las rocas pierden, poco a poco, las cualidades de dureza y tenacidad que presentan en las inmediaciones de la superficie terrestre, y que van adquiriendo plasticidad¹. Descansando la corteza sobre sustancias plásticas, tienen que darse en ella las circunstancias inherentes a la presión hidrostática. Es decir, la corteza tiende a un equilibrio ponderal; las masas de mayor peso se hunden, según el principio de Arquímedes, en las zonas profundas, y las más ligeras flotan y emergen de ellas. Los valores de la gravedad, poco variables en las zonas continentales y oceánicas, indican que la igualdad gravitativa, la Isostasia, está casi lograda.

Para explicar la enorme diferencia entre las tablas continentales y los fondos oceánicos se opina que los continentes son como almadías constituidas por rocas

¹ Las propiedades de rigidez y plasticidad no se excluyen entre sí. Bajo la influencia de fuerzas que actúan durante corto tiempo un determinado cuerpo puede comportarse como un sólido, pero si tales fuerzas son duraderas, el cuerpo adquiere cierta fluidez. En virtud de las vibraciones sísmicas, dedúcese que la corteza terrestre se comporta como rígida; según W. Schweydar, las deformaciones que la Tierra experimenta en virtud de las fuerzas tidales y de los períodos de rotación, dan a la Tierra el carácter de un cuerpo dotado de elasticidad. La figura de rotación de la Tierra es, empero, casi la misma que la de un cuerpo fluido dotado de rápido movimiento y de igual densidad. De aquí que sea admisible la idea de que los períodos geológicos puedan dar origen a eficaces aumentos de presión en el cuerpo sólido terrestre y producir movimientos fluidales.

siáticas principalmente, las cuales descansan sobre el sima, de mayor densidad, mientras que bajo los océanos este substratum símico está al descubierto o sólo soporta una delgada capa siática.

El principio isostático no implica que Sial y Sima estén separados por una solución de continuidad o tránsito brusco. Existe entre uno y otro una mutua interpenetración, lo mismo en dirección perpendicular que horizontalmente. Tampoco es inverosímil que los bloques continentales encierren en la profundidad enclaves o isleos de materia simática (véase § 6). Lo mismo que ocurre en la superficie exterior de las almadías continentales, también en su cara inferior tienen una superficie irregular que fluctúa alrededor de una de nivel. Las grandes altitudes continentales, como los Alpes, el Himalaya, presentan anomalías gravitativas locales mucho más pequeñas que las que de su masa cabía esperar; las masas montañosas deben estar, pues, compensadas por defectos de masa invisibles; esta aparente contradicción se desvanece fácilmente con admitir que las tablas continentales por debajo de las cordilleras y grandes relieves tienen un espesor más grande que en las regiones restantes, y que las montañas, al formarse, no sólo crecen en altura, sino también en profundidad.

Conocidos los valores de las densidades del Sial y del Sima, fácil es fijar la profundidad a que las masas se neutralizan isostáticamente. Esta superficie profunda se llama «superficie de compensación». Sobre este nivel actúa en todas partes la misma carga de rocas. Según R. Helmert, se halla a 120 km. por debajo de la superficie terrestre. En determinadas regiones parece aproximarse hasta sólo 60 km. del suelo.

Bajo el peso de los caparazones de hielo diluviales las regiones continentales polares debieron de hundirse. Todavía hoy persiste el proceso de restablecimiento de la compensación isostática consecuente a la fusión del

hielo. Escandinavia va irguiéndose como una almadría flotante a la que se libera de la carga; la costa del Golfo de Botnia se eleva anualmente cerca de un centímetro.

De esto debe deducirse que la Isostasia no es más que la tendencia remota a que las masas de la corteza terrestre propenden, fin que jamás y en parte alguna es alcanzado. Sólo se tienen comprobaciones aproximadas para regiones de unos 100.000 km.² de superficie. Las zonas de poca extensión no acostumbran a estar compensadas; éste es, por ejemplo, el caso del Harz. Todavía existe la posibilidad de que la Isostasia no sólo presente grandes anomalías locales, sino también a lo largo de los tiempos, y que en la actual época geológica sólo de una manera imperfecta está lograda, pues, sin ir más lejos, en el reciente pasado geológico, en el Terciario, las gigantescas fuerzas orogénicas crearon un estado de equilibrio en las presiones casi perfecto, el cual, aunque transitorio, todavía persiste en la actualidad (véase §§ 4 y 29).

§ 4

Los geosinclinales. Permanencia de los continentes y océanos

Es en las montañas del globo especialmente donde han sido plegadas las rocas sedimentarias. Los plegamientos no se han extendido, en general, a las regiones cristalinas. La mayor parte de los sedimentos son de origen marino; en el interior de los continentes las zonas de sedimentación son de mucha menor importancia que las oceánicas. Se sabe que los sedimentos marinos corresponden, en su mayor parte, a las regiones costeras o planazas litorales de los continentes, las cuales son fondos de mares poco profundos. Puesto que su espesor alcanza, empero, aquí y allá, muchos kilómetros, durante

su formación la superficie de estos depósitos ha debido experimentar un hundimiento. El aumento de la carga producido por los mantos sedimentarios ocasionó el hundimiento correlativo. Las zonas enclavadas entre los bordes de los continentes inmediatos y, por consiguiente, de forma alargada o en bandas, se llaman, desde J. Dana, *Geosinclinales*. Son ellas las porciones menos resistentes, más móviles de la corteza terrestre rígida, y por esto mismo constituyen las matrices de las cordilleras.

La cordillera emergida del geosinclinal acaba por formar parte del continente. Así, pues, el continente crece a expensas del geosinclinal. Simultáneamente la zona de sedimentación ensancha sus dominios océano adentro. La porción plegada del geosinclinal pierde, en general, el carácter de movilidad por efecto del propio plegamiento. En virtud de éste, masas eruptivas (intrusiones y macizos centrales) quedan aprisionados en los sedimentos que ocupan las grandes concavidades de los pliegues, contribuyendo a dar solidez al edificio montañoso. Por consiguiente, si una nueva serie de pliegues surge, se producirá junto a la región precedentemente plegada; el plegamiento emigra. Europa está constituida por una antigua masa resistente de rocas cristalinas agrupadas al N. y al E., circundada por una corona de pliegues sucesivos o concéntricos (pliegues heronianos, caledonianos, hercinianos, alpinos), que han ido emergiendo a lo largo de los tiempos. El geosinclinal del cual emergieron las cordilleras producidas por esos pliegues escalonados, la *Tethys*, ha ido achicándose más y más, hasta quedar hoy reducido al Mar Mediterráneo.

Asimismo, las fases preparatorias de un plegamiento aislado permiten reconocer una cierta ley. Comienzan a producirse en el lado de la zona móvil inmediato al borde del continente, y después alcanzan sucesivamente a las zonas próximas del propio continente. Por consiguiente, al movimiento centrífugo (continental-centrífugo) de los

pliegues corresponde otro movimiento en retroceso (emigración e inmigración del plegamiento, según H. Stille¹).

También los pliegues montañosos se disponen, en general, hacia el interior de los continentes y se superponen.

El hecho de que muchas zonas de tierras firmes o rígidas, como Escandinavia, Africa Central, Brasil, Labrador, desde los tiempos más remotos no hayan sido jamás invadidas por el mar, ha servido de base para la teoría de la permanencia de los continentes y los océanos. El otro hecho, en cuya virtud los geosinclinales han estado cubiertos por el mar durante determinados períodos, y en otros fueron regiones emergidas, indica, empero, que esta ley no puede ser válida sino de una manera restringida. Es, en efecto, verosímil que, así como determinadas regiones continentales jamás se han hundido bajo el mar, de igual modo ciertos dominios oceánicos nunca han emergido al exterior. Pero si se acepta que hoy día mismo los continentes no son permanentes en toda su extensión, lo mismo habría que admitir para los fondos oceánicos. La hipótesis de los puentes continentales a través de los océanos ha sido invocada repetidamente por los paleontólogos para hallar una explicación a las emigraciones de las floras y las faunas.

Si los geosinclinales (y puentes continentales) pueden emerger y hundirse, el principio de Isostasia (véase § 3) experimenta excepciones. En la corteza terrestre, o debajo de ella, deben existir, pues, fuerzas capaces de producir perturbaciones en el equilibrio gravimétrico de las masas. La Isostasia no es en modo alguno un estado permanente, sino tan sólo una tendencia de que están animadas las masas de la corteza terrestre, algo que están siempre más o menos distantes de alcanzar. En virtud

¹ Alte und junge Sauntiefen. *Nachr. J. K. Ges. d. Wiss., Göttingen, Math.-phys. Kl.* 1919.

de los fenómenos geotectónicos, se trata más bien de una fuerza pasiva que de una fuerza activa (§ 30).

§ 5

Períodos orogénicos y epirogénicos. Marcha cíclica de la evolución

El desarrollo de la Tierra no se efectúa de una manera uniforme, sino con alternativas. La formación de las montañas, la orogénesis, sólo tiene lugar en determinados períodos y se extiende a dilatadas regiones de la Tierra. La duración es relativamente breve. Es un proceso de arrugamiento que sólo afecta a pequeñas zonas de los geosinclinales, y las capas sedimentarias de estas zonas experimentan un acortamiento en sentido horizontal. En los períodos intermedios se producen movimientos en sentido perpendicular, lentos, que afectan a las pequeñas zonas que bordean a los continentes y a los mismos escudos continentales (verosímilmente a los fondos oceánicos también). Por esto se llaman movimientos epirogénicos. Si un escudo continental se hunde, el océano invade porciones periféricas suyas; hay transgresión. Si se levanta, entonces partes del continente quedan en seco; tiene lugar una regresión.

Considerado en sí mismo, el plegamiento de las cordilleras no es un proceso continuo, sino intermitente. El plegamiento principal de los Alpes tuvo lugar, p. ej., en el Mioceno, pero se prolongó hasta dentro del Plioceno. Ya en el Eoceno tuvieron lugar pequeños pliegues. La orogénesis alpina se habría iniciado ya durante el Jurásico y el Cretácico mediante plegamientos circunscritos a determinados puntos de las zonas inmediatas (plegamientos kimmeridgienses y senonenses).

El carácter de los procesos orogénicos es muy difícil de bosquejar. Cuando se los denomina Revoluciones (W, y,

Seidlitz), Paroxismos (W. Salomon), Diástrofes (E. Ulrich), Accesos febriles (H. Stille), quiere decirse con ello tan sólo que en períodos relativamente breves tienen lugar grandes trastornos, pero no que se efectúen de una manera súbita, catastrófica. Esta premisa supone que las Orogénesis abarcan períodos que sólo pueden ser evaluados mediante unidades cronológicas de escala geológica. De ello no debe inferirse que los procesos geológicos estén integrados por pequeñas catástrofes locales. W. Salomon indica sobre esto ¹ que los límites marcados, que pueden reconocerse en grandes extensiones, de las rocas sedimentarias (formadas durante los períodos anorogénicos), presentan huellas de acciones posiblemente catastróficas ². Lo que decimos de los períodos intermedios a las orogénesis no sería menos exacto para las orogénesis mismas.

La investigación ha señalado que de una manera parecida a las Orogénesis, también las Epirogénesis están sometidas a regla. Ciertamente no existe tan marcada la simultaneidad orogénica, pero es fácil formularla. Es así: «tanto las transgresiones como las regresiones tienen lugar por toda la Tierra, generalmente al mismo tiempo y en igual sentido». Esta regla se aplica, desde luego, a los períodos orogénicos; simultáneamente con las cordilleras se levantan también los escudos continentales inmediatos a ellas, emergiendo del mar ³. En los períodos anorogénicos se encuentran muchas excepcio-

¹ *Tote Landschaften und der Gang der Erdgeschichte.* (Paisajes muertos y la marcha de la historia terrestre.) *Sitzungsberichte d. Heidelberger Akad.*, 1910.

² También la muerte en masa de muchos animales y la sedimentación en capas de sus cadáveres se explica fácilmente mediante la suposición de sucesos catastróficos.

³ Acerca de esto H. Stille, al cual se deben los estudios más profundos sobre *Transgresiones y Regresiones*, disiente de E. Haug, que llega a la conclusión que el levantamiento de las cordilleras se efectúa con transgresiones en las zonas extrageosin-

nes de la regla: sin embargo, también aquí los movimientos del mar son de amplitud universal.

Según lo que acaba de consignarse, el desarrollo geotectónico no se efectúa de manera uniforme o regular. Los períodos de actividad mínima alternan con los muy activos. «Predominan en la corteza terrestre movimientos permanentes—aquí se levanta, allá se hunde, cual una lenta respiración del cuerpo terrestre. Pero de vez en cuando surgen paroxismos, accesos febriles, la respiración se hace extraordinariamente intensa, y sobrevienen plegamientos. El paroxismo termina, y la respiración tranquila se reanuda. Vivimos en tiempos de Epirogenésis, de respiración tranquila de la corteza terrestre»¹; pero tal vez nos hagamos una ilusión. Estamos inclinados a considerar los movimientos epirogénicos como incesantes, cuya medida no nos es conocida sino de un modo indirecto, como desplazamientos seculares de las costas o nivelamientos repetidos. Y, como ya se ha observado, no se deduce que también en los fenómenos epirogénicos alternen movimientos continuos con otros relativamente rápidos y discontinuos².

Las capas sedimentarias alternantes que aparecen en regiones muy apartadas entre sí, depositadas durante los períodos epirogenéticos, indican la intervención de fenómenos que han abarcado amplios dominios del globo durante el desarrollo de tales movimientos. De qué naturaleza hayan sido esos fenómenos, esas fuerzas, no lo sabemos. Quizá se trate de movimientos de naturaleza semeiante a los movimientos sísmicos, pero mucho más

climiles inmediatas. Véase H. Stille, *Studien über Meeres- und Bodenschwankungen* (Estudios sobre oscilaciones del mar y del suelo). *Nachr. d. Kgl. Ges. d. Wiss. Göttingen; Math.-phys. Kl.*, 1922, p. 83.

¹ H. Stille, *Die Schrumpfung der Erde*. (El arrugamiento de la Tierra.) Berlin, 1922.

² Véase H. Stille, en otro lugar, p. 26, y A. Born, *Isostasias y Gravimetria*, Berlin, 1923, p. 135. Véase § 29.

grandes que los que el hombre ha conocido durante el corto período histórico. Quizá también sea que «la Tierra siempre sólida» comience ahora su sueño. Puede haber alcanzado ya este momento. Y si su energía vital revive por espacio de un instante para producir en el estancado desarrollo epigénico una nueva sacudida, aquella alternancia de capas tan inocente pudiera producir en la evolución de la humanidad un cambio de proporciones trágicas que incluso sería capaz de acarrear su aniquilamiento casi total.

§ 6

Volcanismo y terremotos

El total de volcanes en actividad es de 400, aproximadamente, siendo submarinos la quinta parte. Están distribuidos irregularmente sobre la superficie del globo. La mayor parte radican en las dos grandes zonas de plegamiento: en la mediterránea y en la circumpacífica. Aislados o reunidos los hay, además, en la porción septentrional del Océano Atlántico, en la porción central del Atlántico y del Pacífico, en el África Central y en la Antártida. Los volcanes del primer grupo se denominan de la familia Pacífica, y los del segundo, de la familia Atlántica.

El contraste entre ambos grupos estriba en la diferencia de los magmas originarios. La familia atlántica se caracteriza por un gran contenido en álcalis (serie alcalina); en los magmas pacíficos el calcio y el magnesio desempeñan un importante papel (serie calco-alcalina). Esta diferencia se manifiesta ya también en las rocas eruptivas de las épocas geológicas anteriores. El grupo pacífico está circunscrito a las grandes zonas de plegamiento de la tierra, y el atlántico radica en las

zonas con grandes dislocaciones perpendiculares entre sí, es decir, en los países tabulares.

Para la explicación de los fenómenos volcánicos se supone que bajo la corteza terrestre rígida existen reservorios magnéticos, que se insinúan entre la corteza. Si estos reservorios secundarios hallan paso hasta el exterior, aparecen volcanes; en otros casos sólo dan lugar a fenómenos criptovolcánicos, es decir, a intrusiones volcánicas, batolitos y lacolitos. Que los reservorios magnéticos primarios constituyan una capa continua de materias fluidas no es cierto ni deja de serlo, a pesar de observaciones bien decisivas, como las ondas sísmicas ¹, ya que, según W. Schweydar, la naturaleza de las oscilaciones de los polos no conduce a una tal suposición ².

Según el pensar de la mayoría de los investigadores, la diversidad de los magmas es un fenómeno secundario. Todos los magmas, recientes y antiguos, proceden de un magma único, basáltico, fundamental, cuya composición varía a consecuencia de asimilaciones, diferenciaciones y difusiones gaseosas ³.

El hecho de que los volcanes estén localizados en las grandes zonas de plegamiento y a lo largo de las líneas de fractura de la tierra obedece a una mutua dependencia intensa entre los fenómenos volcánicos y los fenómenos tectónicos. En general ha sido establecido que la disminución local de presión aumenta la movilidad del magma, y que los fenómenos tectónicos que abren fracturas en la corteza terrestre facilitan su elevación desde las grandes profundidades. Los gases escapados por frac-

¹ Según E. Wiechert, ondas sísmicas típicas pueden producirse como vibraciones peculiares de una corteza sólida que descansa sobre una capa elástica.

² El movimiento de los polos en relación con la rigidez y con una hipotética capa magnética de la Tierra. *Veröff. d. Preuss. Geod. Inst.*, N. F., núm. 79.

³ Fusión y asimilación de rocas vecinas, su estratificación según densidades, difusión de gases ocultos en las rocas próximas.

turas pueden, ocasionalmente, dar lugar también a la formación de cráteres de explosión (Mares del Eifel, Necks en el Alb de Suabia).

Los terremotos también están localizados en determinadas zonas de la Tierra, y asimismo es patente el hecho de que las zonas de gran sismicidad vuelven a coincidir con las fajas de plegamiento mediterránea y circumpacífica. Los escudos continentales antiguos y no plegados están casi libres de terremotos. Según su origen, los terremotos pueden ser volcánicos y tectónicos. Los terremotos que inician o acompañan a erupciones en las regiones volcánicas alcanzan gran violencia; a cierta distancia apenas son perceptibles. Los grandes terremotos, que se hacen sentir en extensas regiones, a veces en todos los ámbitos de la tierra, son de naturaleza tectónica. Hacen pensar en una liquidación de las presiones que actúan en la corteza terrestre. Puesto que la zona de fluidez de las rocas comienza ya a 50-60 km. de profundidad, la profundidad de los puntos donde los movimientos tectónicos se inician no puede ser mayor de esta cifra. Para muchos movimientos sísmicos de las regiones circumpacíficas se han hallado profundidades de más de 100 km. Su origen serían fenómenos criptovolcánicos. Circunstancialmente, los fenómenos subsiguientes a los terremotos son los desplazamientos del terreno en direcciones horizontal y vertical. Pueden alcanzar a veces varios metros. Los terremotos indican que todavía las fuerzas orogénicas y epirogénicas persisten en los actuales tiempos geológicos.

§ 7

Desplazamientos de la corteza

Un crecido número de investigadores opina que toda la corteza terrestre, o partes de la misma, son desplazables sobre su substratum plástico. Según A. Wegener,

los escudos continentales son capaces de experimentar derivas sobre el océano de rocas simálicas. F. Kossmat explica las cadenas montañosas, y con ellas los geosinclinales, como fajas limitantes que se desarrollan allí donde existen amplias zonas de corteza próximas entre sí. O. Ampferer habla de extensas migraciones de territorios. D. Kreighauer supone que toda la corteza terrestre resbala en direcciones arbitrarias sobre el núcleo terrestre. Finalmente, existen los partidarios de la hipótesis de la contracción, en virtud de la cual, cuando el interior de la Tierra se concentra, nace en el manto cortical un esfuerzo tangente que origina arrugas en determinados puntos débiles del manto, lo cual sólo es posible si en éstos existe una cierta consistencia y movilidad. Vamos a averiguar si la idea de los desplazamientos de porciones de la corteza es viable ¹.

Demuestra la Hidrodinámica que si se supone dos planos paralelos muy extensos, separados por un espacio fluido, de los cuales uno ha de desplazarse en su propia dirección con la velocidad constante, y la fuerza necesaria para la unidad de superficie de este plano en la dirección del movimiento deberá ser

$$p = \mu \frac{V}{D}$$

En esta fórmula, μ representa los coeficientes de fluidez; D , la distancia de los dos planos. Si suponemos un bloque de corteza terrestre que tenga de lado la longitud a , y un espesor igual a d , la fuerza total necesaria para su desplazamiento será pa^2 . Si el desplazamiento ha de ser consecuencia de una presión horizontal que incide sobre la trasera del escudo continental, el

¹ Véase Pa. Nörre, Crítica de la hipótesis de la contracción. *Centralblatt für Miner., Geol., u. Pal.*, 1923, p. 78.

valor de esta presión que actúa sobre el conjunto de este escudo es

$$p' = \frac{pa^2}{ad} = \mu \frac{av}{Dd}$$

Si los escudos no han sufrido destrozos a causa de las presiones deformadoras, p' tiene que ser menor que la resistencia de la materia que los constituye ante estas presiones. Para las rocas, p' , suponiendo que la presión actúa por un solo lado, es del valor de 10^9 dinas, y si actúa en todas direcciones, tiene valores mucho más elevados. En las zonas profundas la presión horizontal que actúe sin alcanzar el límite de la destrucción o alteración de los materiales, llega a los mismos valores que la gravedad. Esta presión alcanza casi el valor de $2 \cdot 10^{10}$ dinas a 50 km. de profundidad. Por lo tanto, en los escudos de la corteza terrestre las fuerzas horizontales deformadoras no hay que suponerlas de un orden $p' < 10^{10}$. El espesor del bloque o escudo, d , se calcula entre 50 y 60 km. Según las investigaciones de Schweydar¹, la capa plástica que debe de hallarse debajo de la corteza sólida tendrá un espesor de 600 km.; su viscosidad máxima sería del orden 10^{18} g/cm. sec., y la amplitud de sus vibraciones sería compatible con un período 120 veces más rápido. Los escudos corticales se desplazarían a una velocidad de $v=1$ cm. al año, o, lo que es lo mismo, de 10 km. cada millón de años. Es admisible un tal desplazamiento de conjunto en las zonas de plegamiento, más plásticas, de la Tierra, si se tiene en cuenta que la duración de los períodos orogénicos no es menor, a lo que parece, que la de los períodos inter-

¹ W. Schweydar, Die Polbewegungen in Beziehung zur Zähigkeit und zu einer hypothetischen Magmaschicht der Erde. *Vierteljahrsschrift. Preuss. Geod. Inst.*, N. F. Nr. 79.

medios; un desplazamiento general más rápido daría un carácter catastrófico a las orogénesis. Con los valores que antes hemos supuesto, $\mu = 5.10^{22}$ g/cm. sec.

Si la viscosidad del estrato infracortical tuviese ese valor, la fuerza de tracción más enérgica sobre la corteza lograría vencer las fricciones inherentes al desplazamiento, pero no podría originar ningún plegamiento. La viscosidad de la zona infracortical debe ser, por tanto, de un valor considerablemente inferior al consiguado.

En los 300 km. exteriores de la envoltura terrestre no existe ninguna corriente de convección térmica, a pesar de la disminución de la temperatura, y en su virtud, la viscosidad sería, según Jeffreys, del orden de 5.11^{22} g/cm. sec.¹.

Ahora bien; las considerables profundidades de muchos terremotos en las regiones circumpacíficas han demostrado recientemente que en las capas que se hallan debajo de la corteza tienen lugar compresiones entre unas masas y otras. El hecho de que aquellas sacudidas sólo quepa considerarlas como fenómenos criptovolcánicos induce a pensar que la viscosidad en las zonas profundas sea menor que los valores que le atribuía Jeffreys. También la frecuencia de rocas intrusivas, la presencia de lacolitos y de mantos lávicos, demuestra la posibilidad de corrientes en las capas infracorticales.

Basta con que la viscosidad en la capa infracortical rebase sólo una fracción del valor 5.10^{22} g/cm. sec. para que, a causa de la deformación operada en la corteza, se pierda también una fracción del esfuerzo de compresión.

Con esto queda demostrada la admisibilidad de la teoría de los enormes desplazamientos de la corteza. Si se pueden invocar fuerzas como las expresadas, capaces de

¹ H. JEFFREYS, *The Earth*, Cambridge, 1929, págs. 140 y 296.

vencer la considerable resistencia frontal que se opone al desplazamiento de la corteza, es posible despreciar el trabajo de fricción que tiene lugar en la zona infracortical.

§ 8

Migraciones polares

La idea de los desplazamientos polares desempeña gran papel en la explicación de los problemas paleoclimáticos. A. Wegener, H. Simroth y otros los han invocado como fundamento de la génesis de las cordilleras. Hay que distinguir tres casos:

1. La Tierra es un cuerpo rígido o sólido elástico. El movimiento de rotación de un cuerpo perfectamente rígido admite un estudio matemático completo. Nos ceñiremos a lo que nos dicen los resultados.

El movimiento libre de un cuerpo sólido es un movimiento circular complejo, el cual puede descomponerse en dos movimientos de rotación sencillos que tienen lugar en un cuerpo rotatorio cuyas masas son simétricas con el eje de simetría geométrico¹ y están dispuestas según los planos trazados perpendicularmente por el centro de gravedad. El cuerpo gira con velocidad regular constante alrededor de una recta que pasa por su centro de gravedad como eje del momento de rotación plana máxima, cuya situación no varía en el espacio, y de manera que el eje de simetría y el geográfico están siempre formando el mismo ángulo. Además gira, en sentido inverso o contrario, alrededor de su eje de simetría, igualmente con velocidad angular constante, que depende del valor del aplastamiento. El eje momentáneo resultante de la combinación de ambas rotaciones está en el mismo plano que los ejes de simetría y de po-

¹ Se entiende por eje de simetría en la Tierra la línea comúnmente considerada como eje, es decir, el eje más corto del elipsoide de rotación, con los polos geográficos en sus extremos.

sición, y con ambos forma ángulos de valor constante. Si, como en la Tierra, el aplanamiento es pequeño el eje de rotación está tan cerca del de posición, que ambos no suelen ser distinguibles ¹. La posición del eje de rotación en el espacio puede considerarse como invariable. Mas como varía con respecto al cuerpo terrestre (o, por mejor decir, es el cuerpo el que varía de posición con respecto a ella), sus polos describen un movimiento (aparente) de precesión alrededor del polo de simetría. El período de este movimiento comprende, para una Tierra totalmente sólida, trescientos cinco días (período de Euler). Puesto que la Tierra no es completamente sólida, sino que tiene una cierta elasticidad, el período se prolonga hasta cuatrocientos veintiocho días (período de Chandler).

Los desplazamientos de masas geológicas, ocasionados por la denudación, la sedimentación, la formación de caparazones glaciares, los levantamientos y los hundimientos, introducen leves variaciones en la situación de los ejes principales de inercia de la Tierra. A consecuencia de estas alteraciones, el eje de rotación no coincide jamás con el eje geométrico de simetría, y en su virtud, el eje de rotación describe en derredor al de simetría el movimiento de precesión indicado; es decir, tienen lugar oscilaciones del polo ². De lo expuesto se

¹ El ángulo entre ambos no es más que $\frac{1}{360}$ del ángulo que forman entre sí el eje de simetría y el de posición. En virtud de los movimientos del eje establecidos mediante los servicios de latitudes internacionales, el polo de rotación y el polo de posición o geográfico sólo están separados por dos centímetros.

² En virtud de la disposición simétrica de las masas en el cuerpo de rotación, los tres ejes principales de inercia coinciden con el de simetría y con dos diámetros ecuatoriales. Si sobrevienen variaciones de posición de las masas y a consecuencia de ellas varían las situaciones de los ejes principales de inercia, ocurre lo que más arriba se ha dicho del eje de simetría, y de los ejes principales de inercia subordinados al momento máximo de inercia.

deduce el carácter de estas oscilaciones a tenor de lo que sigue :

a) Son de breve duración, que en el caso de una Tierra completamente elástica es de trescientos cinco días ; pero en virtud de la elasticidad, es algo mayor : mas siempre estos períodos son insignificantes en relación con la inmensidad de los tiempos geológicos.

b) La amplitud de las oscilaciones es muy pequeña. En su virtud, se explica que cuando el ángulo entre el eje de rotación y el de simetría alcance un valor notable, sobrevendrán, o bien algunos desplazamientos bruscos de masas, de gran amplitud, o un gran número de desplazamientos menos considerables y dirigidos siempre en el mismo sentido. Acontecimientos catastróficos de la primera especie son, empero, extraordinariamente inverosímiles, siendo posibles los de la segunda especie, en virtud de la observación confirmada de desplazamientos de masas, aunque si hubieran de quitar regiones terrestres completas o rellenar cuencas oceánicas, sólo pequeña influencia tendrían sobre la situación de los ejes principales de inercia, ocurriendo, además, levantamientos en diversos lugares de la Tierra simultáneamente, en grandes proporciones y totalmente.

Las oscilaciones polares de esta especie se separan, por esto, de la discusión de los problemas paleoclimáticos.

2. La masa de la Tierra es flúida o flúido-viscosa. De una manera semejante a lo que sucede en una Tierra sólida, en una Tierra flúida o flúido-viscosa pueden también sobrevenir desplazamientos de los ejes principales de inercia, capaces de modificar la posición del eje de rotación (propiamente hablando, desplazamientos de la masa terráquea o de porciones de la misma hacia posiciones tales que no varíen el eje de rotación). En este caso las oscilaciones del polo no presentan carácter periódico alguno. En general carecen de regularidad en el

tiempo, y, por consiguiente, con tiempos lo suficientemente dilatados pueden acarrear grandes desplazamientos polares.

He aquí la explicación: el estudio matemático de la rotación de un cuerpo fluido se circunscribe a la investigación de las deformaciones que el cuerpo experimenta en su totalidad, y de las influencias que estas deformaciones ejercen sobre la posición de los ejes principales de inercia y del eje de rotación de todo el cuerpo, pero no sobre el movimiento de las porciones de masas aisladas. Para el cálculo matemático carece de importancia si, por ejemplo, dos porciones de masas o dos complejos de masas permutan su situación, no cayendo simultáneamente bajo la influencia de otras masas perturbadoras. Para el problema de los desplazamientos polares es, en cambio, de la mayor importancia la posibilidad de semejantes cambios de lugar. Debe tenerse en cuenta que sobre el cuerpo redondo fluido nadan escudos sólidos, cuyas masas pueden quedar abandonadas a sí mismas con respecto a la masa de todo el cuerpo. Es claro, pues, que serían necesarias fuerzas poco intensas para producir el desplazamiento de estos escudos, es decir, para trasladarlos de las proximidades del polo al ecuador. La reacción de este desplazamiento sobre el movimiento de rotación de toda la masa sería insignificante a causa de la pequeña masa de los escudos; pero habría tenido lugar una gran variación de los polos¹. El desplazamiento meridiano de masas superficiales de una Tierra fluida pudiera tener efecto, por ejem-

¹ Si el cuerpo fluido estuviese cubierto por un pellejo plástico y coherente, bajo este pellejo estarían antes vivientes y pensantes, contenidos en la parte fluida, los cuales podrían continuar el común trabajo sobre ella, en tanto que los seres vivos situados sobre la cara exterior del pellejo experimentarían una variación polar de máxima escala. Pues bien: sólo tendría lugar un imperceptible cambio de masa, pero ninguna deformación, sin que variase la rotación del conjunto.

plo, bajo la acción de la marea lunar. Pues debido a que la órbita de la Luna no coincide con el ecuador terrestre, las porciones que en las ondas de marea se levantan y se hunden no vuelven a ocupar exactamente sus antiguas posiciones, ya que con cada nuevo período tidal se mueven lentamente y, por cierto, en la misma dirección aproximada durante largo tiempo.

También las corrientes de convección en cuerpos de rotación fúidos pueden originar desplazamientos relativamente considerables de masas y, por tanto, grandes oscilaciones polares. En la Tierra tienen lugar, sin duda, tales desplazamientos. Corrientes de agua caliente ecuatorial marchan hacia los polos, y masas de agua fría se desplazan hacia el Ecuador. Los icebergs que acompañan a las corrientes frías determinan grandes desplazamientos, relativamente, de los polos ¹.

3. El interior fúido o fúido-pastoso del globo terráqueo está encerrado dentro de una cáscara sólida. Este caso requiere particular atención, pues a una determinada profundidad comienza, bajo la corteza sólida, la zona de las rocas en estado fúido, y un cálculo precedente (véase § 7) ha demostrado que basta suponer fuerzas relativamente débiles para que los escudos corticales, que en su parte frontal no tienen que vencer ninguna resistencia, resbalen sobre el substrátum plástico.

En los párrafos anteriores se ha dicho que en cuerpos en rotación fúidos o plásticos en que tienen lugar mareas, corrientes de convección, pueden ocurrir desplazamientos de masas capaces de producir oscilaciones

¹ Las conclusiones de J. Schiaparelli sobre posibles alteraciones del eje de un cuerpo fúido en rotación (*De la rotation de la terre sous l'influence des actions géologiques*, Mém. prés. à l'observ. de Pulkowa, 1889), son incorrectas (véase Fr. Nölke, *Petrom. Mitt.* 1922, cuaderno de abril-mayo). A muchos investigadores, H. Simroth, A. Wegener, W. Köppen, les ha llevado a conclusiones erróneas.

polares relativas. Las mismas causas pueden obrar en un cuerpo en rotación fluido o pastoso envuelto por una cáscara sólida. El que, empero, los movimientos de masas en un núcleo fluido puedan trascender también a la superficie, depende del estado del caparazón y de la clase de sus conexiones con el substrátum plástico. Las corrientes del substrátum sólo pueden hacerse sentir en forma de frotamientos en el caparazón. Si el rotamiento es tal que en el caparazón el movimiento de propulsión rebasa las resistencias, entonces la masa del caparazón sigue a la corriente; en otro caso las masas desplazantes quedarán retrasadas. Además, existe la posibilidad de que las desigualdades de masa del caparazón desarrollen fuerzas centrífugas desiguales conducentes a una resultante meridiana que acarrea un desplazamiento de la corteza sobre el núcleo plástico.

Con arreglo a esto pueden tener lugar desplazamientos de los polos, bien si el mosaico de escudos de la corteza terrestre fuese tan fofamente estructurado que las presiones desplazatorias aflojasen su trabazón interna y los escudos aislados pudieran adoptar movimientos autónomos (idea de A. Wegener), o si la corteza terrestre, en su totalidad, como un pellejo elástico, fuese dúctil y comprimible (hipótesis de E. Dacqué), o, finalmente, si en determinados lugares se desgarrase y en otros se plegase (criterio de D. Kreichgauer).

Si se designa por r el radio ecuatorial de la Tierra, y por λ su aplastamiento, el radio correspondiente a la latitud α es $r(1 - \lambda \text{ sen.}^2 \alpha)$. Un sencillo cálculo deducido de esta fórmula demuestra que el radio terrestre, al aumentar la longitud en el pequeño ángulo δ , se alarga $\lambda r \text{ sen.}^2 \alpha \text{ sen.} \delta$, y la circunferencia terrestre U , en las proximidades del Ecuador, crece en $\frac{1}{2} \lambda U \text{ sen.}^2 \alpha \text{ sen.} \delta$. En la latitud 45° ; a una diferencia de latitud de 1° corresponde, por consiguiente, una diferencia de circunferencia terrestre de 1,16 km. Por un despla-

zamiento de la corteza terrestre de sólo 100 km. en dirección meridional debiera producirse, pues, por la presión o por el arrugamiento, una diferencia de 1 km. en la circunferencia. El módulo de elasticidad indica la presión por cm.^2 que una barra requiere para acortarla en la centésima parte de su longitud; en las rocas cristalinas es de 5.000 a 10.000 kgs. Un acortamiento de la circunferencia terrestre de 1 km., es decir, $1/40.000$, exige, pues, una presión de 12 a 25 kgs. por cm.^2 sobre la superficie normal a la dirección en que esta presión actúa. Para llegar a esta presión debería ser necesaria una determinada presión desplazatoria dispuesta perpendicularmente, en dirección meridiana. Vamos a plantearnos este problema con el fin de llegar a un valor aproximado.

Suponiendo que la corteza terrestre se hallase en libre suspensión, sus masas soportarían, según Wepfer¹, una presión horizontal de alrededor de 2 millones de kg./cm.^2 . La presión de 12 a 25 kg./cm.^2 , ya indicada, disminuye la pesantez de la corteza en una 100.000^{a} parte; a un aumento de inclinación de d'' corresponderá una disminución de $P=d/100.000$ del valor de la pesantez. Si sobre una porción del anillo cortical situado en la latitud β actúa una fuerza P en la dirección del radio vector, su componente horizontal perpendicular al plano del anillo será igual a $P \lambda \cos \alpha \sin \beta$. Como β oscila entre 0 y α , su valor máximo es $\frac{1}{2} P \lambda \sin 2 \alpha$. Para las migraciones de los polos se han supuesto variaciones de la latitud de hasta 30° .

Si la tenacidad de las rocas de la corteza se supone igual a 3 g/cm.^2 , $\lambda=1/300$ y $d=30^\circ$, la presión desplazatoria perpendicular a una zona cortical con un frente de 1.000 kilómetros de espesor, a 15° del Ecuador, no rebasaría de 150 g/cm.^2 . Para desplazar 30° sobre la

¹ *Vierteljahrsschr. d. Naturforsch. Gesellsch. Zürich*, Jahrgang 50, 1905, p. 135.

infraestructura, sin fricciones, toda la corteza terrestre en dirección del meridiano (lo cual implicaría una torsión de la corteza alrededor de un eje situado en el plano del Ecuador), la presión sobre el frente posterior de una sección mayor perpendicular a la corteza sólo sería de algunos kg./cm.^2 .

Ahora hemos de pensar si son verosímiles unas fuerzas que sean capaces de producir presiones o empujes desplazatorios como los que se exigen en los párrafos precedentes. Para explicar la fuerza invocada por A. Wegener, en virtud de la cual el desplazamiento de los polos produciría el desplazamiento de los continentes (es decir: la fuerza de rotación resultante de la desigualdad de los relieves terrestres, del nivel profundo distinto entre unos continentes y otros, y las profundidades oceánicas) se recurre a valores del orden que se ha indicado (véase § 18). Lo mismo ocurre con la atracción lunar en su doble acción sobre la Tierra, en virtud de la producción de deformaciones tidales o de marea, y de su tendencia a desplazar de su sitio el rodete ecuatorial, a la cual se debe el conocido movimiento precesional del eje terráqueo.

La onda de marea y el rodete ecuatorial tienden a retroceder cuando la Tierra lleva girada media vuelta; de aquí la posibilidad de que, a causa de nuevas fases del mismo movimiento giratorio, se acumule y haga apreciable una inercia o fuerza residual que actúe sobre las masas durante largo tiempo en el mismo sentido. Acaso sea posible aclarar de esta manera la lenta, pequeña y todavía problemática oscilación secular de los polos de rotación ($0,005''$ al año)¹. También se invoca la fuerza desplazatoria de los polos y la acción de la Luna para explicar fenómenos geológicos pretéritos. Por otra parte, aunque la mayor elipticidad sería causa

¹ B. WANACH, *Die Polenhöhen-schwankungen in den «Ergebnissen der Exakten Naturwissenschaften»*, 2. Bd., 1926; p. 86.

de que la corteza terrestre presentase más resistencia a los desplazamientos, en cambio la mayor rapidez de la rotación y la mayor proximidad de la Luna supondrían mayores intensidades en aquellas dos fuerzas que las que actualmente alcanzan (acerca del ensanchamiento secular de la órbita lunar véase § 16). Según nuestras conclusiones, sólo es posible un desplazamiento *si la resistencia de fricción es ínfima en el plano inferior, profundo, de la corteza*, y esta resistencia es, verosímelmente, tan grande, que la fuerza de la migración polar y de la acción lunar quedan anuladas: como quiera, empero, que no es factible darle valores numéricos exactos, existe todavía la posibilidad de impugnar de una manera provisional los desplazamientos polares ¹.

Como conclusión, podemos afirmar, ante la observación de Rudski, frecuentemente citada ² y otra de Lord Kelvin, parecida, referente a que, como resultado de los estudios paleontológicos, la distribución de las zonas climatológicas en el pasado geológico era distinta de como es en la actualidad, los geofísicos no pueden hacer otra cosa que aceptarla como un postulado. Pero de ningún modo sentar la afirmación de que los fenómenos del pasado geológico, atribuidos por muchos investigadores a los desplazamientos de los polos, no obedezcan a ninguna otra causa. Es más admisible pensar que las variaciones de los polos son de valor despreciable. En cuyo caso es conveniente renunciar a su carácter problemático, tanto más cuanto que existen muchos otros fenómenos que son incompatibles con aquellas (véase § 9).

¹ Acerca de si es aceptable la idea de que la corteza pueda ser arrastrada por corrientes de las capas plásticas profundas, véase § 13.

² M. P. Rudski, *Physik der Erde*, Leipzig, 1911; p. 209.

§ 9

Los periodos glaciares

Varios investigadores creen poder explicar los periodos glaciares mediante desplazamientos de los polos. A. Wegener patrocina esta versión; B. Daqué se inclina a ella, y también F. Kossmat es de opinión que la historia del clima en los tiempos geológicos sigue a grandes oscilaciones de las coordenadas geográficas.

Para los partidarios de la hipótesis de un desplazamiento de los polos en el Pleistoceno será aceptable la conclusión a que llega M. Yokoyama, en virtud de la cual el clima del Japón era más dulce que en la actualidad (véase R. Lepsius, *Geol. Rundsch.*, t. 3, 1912, página 157). Lo contrario opina K. Oseki, quien pone de relieve la existencia de circos glaciares y morrenas en el Norte del Japón (*Geol. Rundsch.*, t. 5, 1914, página 346). También en los Alpes de la China (30° de longitud) existen circos y acumulaciones erráticas a 1.400 metros por debajo del límite actual de las nieves perpetuas. De ello deduce K. Olbricht (*Zentralbl. f. Min., Geol. u. Paläont.*, 1923, p. 726) que el periodo glacial no podría ser explicado por desplazamiento del polo, si no se quiere violentar o retorcer la naturaleza de los hechos. Las calizas coralígenas jóvenes de la bahía de Tokio son, para él, formaciones interglaciares.

Las recientes investigaciones de Obrutschew¹, finalmente, llegan a la conclusión sorprendente, diez años antes todavía completamente inesperada, que toda la cadena septentrional de Mongolia estuvo durante el Pleistoceno sometida a una glaciación que llenaba incluso los

¹ W. A. Obrutschew, Die Verbreitung der Eiszeitspuren in Nord- und Zentral-Asien, *Geol. Rundsch.*, Bd. 21, 1920, p. 243, y Bd. 22, 1921, p. 236.

valles, y Siberia se halló cubierta por un caparazón de inlandsis o hielo continental.

También el hecho de que los fenómenos glaciares cuaternarios hayan tenido lugar sobre cualesquiera puntos de la Tierra, lo mismo en las zonas medias que en las cálidas, y que pueda deducirse una disminución de la temperatura media anual ¹, no se concilia con los desplazamientos de los polos; ello indica que la disminución de la temperatura en el Cuaternario no alcanzaría a particulares regiones, como exigiría la hipótesis de los desplazamientos polares, sino a toda la Tierra.

El glacialismo *pérmico* ha dejado huellas preferentemente en los continentes del hemisferio austral y en el Asia tropical. Numerosos sabios aceptan la idea de que las zonas afectadas por los hielos pérmicos estén recíproca e inmediatamente relacionadas con el Polo Sur. Pero como en todos aquellos lugares cabe distinguir un cierto número de glaciaciones ², y además no hay posibilidad física ni geofísica de suponer un desplazamiento independiente de los escudos continentales (véase § 23), resulta, asimismo, inadmisibile para el pérmico la hipótesis de las migraciones polares.

Bajo distintos aspectos ha quedado de relieve cómo fallan los resultados de las investigaciones acerca de la hipótesis de los desplazamientos polares. De la distribución zonal de animales y plantas fósiles no se puede deducir con seguridad nada relativo a la situación de los polos. En aquélla las circunstancias locales desempeñan un gran papel. Frecuentemente ha sido indicado que hoy día también los polos fríos no coinciden

¹ F. KLARE, Acerca del origen del último período glacial. *Geogr. Zeitschr.*, 1921, II, 9/10.

² W. SALOMON-CALVI, *Die permokarbonischen Eiszeiten*, Leipzig, 1933. En Australia se conocen 5 glaciaciones por lo menos; en Africa y América del Sur, 2 como mínimum; en Asia, sólo 2, separadas por largos períodos interglaciares.

con los geográficos, y que, por ejemplo, la corriente del golfo en Europa alcanza latitudes que en otras regiones de la Tierra sufren los efectos del hielo y la nieve. El hecho de que en Groenlandia y el Spitzberg haya habido en otros tiempos una vegetación subtropical no constituye, en todo caso, ningún apoyo para la hipótesis de los desplazamientos polares. La argumentación que de este hecho deriva conduce a la idea, muy amplia pero completamente arbitraria, de que durante todo el pasado geológico las circunstancias climáticas de la Tierra hubieren correspondido, aproximadamente, a las actuales. Esta idea insinúa un sencillo postulado, y en tanto no puede apoyarse sobre puntos concretos, no es más verosímil que su contraria ¹. Las nuevas investigaciones astronómicas permiten afirmar hoy, con cierta seguridad, que no es admisible tal idea: que de ninguna manera el Sol, durante todo el pasado geológico de la Tierra, ha emitido la misma cantidad de energía calorífica, sino que al igual que las restantes estrellas, hoy día se encuentra ya en un estadio, en el cual su actividad irradiante disminuye continuamente. Si en tiempos pretéritos alcanzase el Sol una gran intensidad de irradiación sobre la Tierra, como la que actualmente recibe quizá el planeta Venus, en el cual se extiende una densa cubierta de nubes desde el Ecuador a los polos y los contrastes climáticos de las zonas casi no existen, la presencia de fósiles de plantas subtropicales en Groenlandia y Spitzberg tendría explicación sencilla. La glaciación de grandes regiones de la Tierra en tiempos muy remotos puede entonces explicarse de una manera natural, sin recurrir a desplazamientos de

¹ Puesto que entre las muchas posibilidades infinitas de concomitancias entre la energía irradiada y el periodo evolutivo del Sol, la idea de una radiación constante sólo se refiere a un caso aislado, la verosimilitud de la misma es infinitamente pequeña; véase Thomson y Tait, en otro lugar, t. I, 2.^a parte, p. 484.

los polos, puesto que también cabe pensar en otras causas. Meinardus ¹ observa que la superficie del inlandeis antártico debía de hallarse primitivamente algunos centenares de metros más elevada que actualmente, puesto que así lo indicaría el volumen de agua de Antartís: de ahí se deduciría que el mayor espesor de los hielos acarrearía una mayor celeridad en su deslizamiento, una más rápida fusión de las masas desplazadas y un aumento de la humedad y las precipitaciones, pero también una dulcificación de la temperatura; y llegaríase a la conclusión que Antartís se hallaría anteriormente bajo condiciones climatológicas mejores que las actuales. Las conclusiones de Meinardus sólo tienen valor para glaciares que en todo su espesor y longitud se hallan a la temperatura de fusión, y puesto que nada de esto acontece en el inlandeis polar, tampoco son definitivas en cuanto al clima de Antartís ², si bien fijan de una manera totalizadora las circunstancias climáticas del período glacial. Siguiendo de deducción en deducción, resulta que si un clima general más favorable ocasiona el aumento de las precipitaciones en estado sólido, los glaciares de alta montaña, cuyo punto de fusión, en el seno de su masa, desciende, se alargarán y espesarán, haciéndose más gruesos y potentes. Todavía hoy en Nueva Zelanda, en las montañas sobre cuyos flancos inciden vientos muy húmedos, los glaciares descienden hasta los bosques subtropicales. De lo dicho se deduce que no es absurda la conclusión inmediata, y casi generalmente admitida, de que los fenómenos glaciares en los tiempos primeros de la historia terrestre sean indicaciones de una glaciación de carácter climatológico, y ésta sólo se explique por la elevada latitud de las regiones

¹ W. MEINARDUS, *Der Wasserhaushalt der Antarktis*, *Nachr. d. Wiss. Ges. zu Göttingen, Math.-phys. Klasse*, 1928; p. 137.

² FR. NÖLKE, *Die Antarktis während der Eiszeit*, *Zeitschr. f. Gletscherkunde*, Bd. 20, 1932; p. 45.

sometidas a la acción de aquéllos. Ello es obvio teniendo en cuenta la presunción muy verosímil de la constancia de la irradiación solar y de que la pérdida de calor que el sol experimenta tiene lugar de una manera lenta, según los postulados de la Física y la Astrofísica. El Permo-carbonífero fué un período de activa orogénesis. La mayor producción de calor en la Tierra tuvo por resultado un aumento de precipitaciones, incluso en forma de nieve. Tan abundantemente alimentados estuvieron los glaciares de las altas cordilleras por las nevazs de los circos, que su espesor y su longitud fueron mucho mayores que los de los glaciares actuales. Las montañas quedaron soterradas por ellos y las laminaron como lamina a Groenlandia el inlandeis que la cubre ¹.

En relación con la idea, no de una modificación de la energía calorífica, sino de la capacidad de penetración de los rayos solares en la superficie terrestre, tenemos las hipótesis glaciológicas de J. Croll y Sv. Arrhenius. Croll atribuye los fenómenos glaciares a las oscilaciones experimentadas por la órbita terrestre en su excentricidad, y Arrhenius a las sufridas en el contenido de CO₂ en la atmósfera.

La influencia de factores astronómicos (oblicuidad de la eclíptica, excentricidad de la órbita, situación de los equinoccios) en las circunstancias climatológicas del globo ha sido analizada por M. Milankovitch ² de la manera más fundamentada. Sin embargo, sólo trata el problema teóricamente y no hace ningún juicio definitivo. Que los citados factores astronómicos no tienen nada que ver en la explicación de los fenómenos glaciares aparece claro en virtud de las siguientes razones:

1. Milankovitch considera que la influencia de estos

¹ FR. NOLKE. Ist es notwendig, vordiluviale Eiszeiten anzunehmen? *Zeitschr. f. Gletscherkunde*, Bd. 22, 1934.

² *Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire*. Paris, 1920.

factores abarca un período que corresponde a los últimos 600.000 años. Pero tales factores no han alcanzado su eficacia sólo en el comienzo de este período, sino que su acción hizose sentir durante todo el pasado histórico de la Tierra. Si realmente hubiesen dado origen a los fenómenos diluviales, el Diluvium no habría sido una catástrofe climatológica con que se cerrase el período terciario, de carácter benigno climatológicamente. Puesto que no es éste el caso, es de esperar que las oscilaciones climatológicas aducidas por Milankovitch sólo puedan tener un carácter secundario, y que el origen fundamental, propio, del período glacial cuaternario no obedezca a los factores examinados por este autor, y que ningún acontecimiento de carácter catastrófico haya traído como consecuencia un «bache» climatológico. Esta caída climatológica se explicaría, en virtud de las conclusiones astronómicas bien establecidas, por una disminución de la radiación solar debida a particulares circunstancias de naturaleza cósmica durante determinados períodos, o porque el Sol penetrase, en su vagar por los espacios, en masas cósmicas nebulósicas de gran extensión, en las que su irradiación sufriese una absorción por estas masas nebulósicas¹.

2. La acentuación de los contrastes climáticos entre las latitudes bajas y altas, así como los estacionales, originada por los valores extremos de la oblicuidad de la eclíptica y de la excentricidad de la órbita, queda en parte otra vez compensada por las corrientes aéreas y marinas, por lo que es tan pequeña que puede despreciarse.

¹ FR. NÖLKE, Sobre el origen de los períodos glaciares. *Die Naturwissenschaften*, t. 9, 1921; p. 850.

—Sobre el problema paleoclimático. *Meteor. Zeitschr.*, t. 39, 1922; p. 1.

Esta idea está en boga también por parte del astrónomo norteamericano H. Shapley: Nota sobre un factor posible en los cambios de clima geológico, *Journ. of Geol.*, t. 29, n.º 6, 1921.

3. La acción de los factores indicados se localiza siempre sólo en un hemisferio; en el otro predominan en igual tiempo circunstancias normales o desfavorables al glaciario. Hasta volver a ellas han de transcurrir largos períodos. Tiene, empero, fundamento sólido la idea de que los dos hemisferios experimentaron la glaciación simultáneamente, no alternativamente.

4. Los acontecimientos que venimos analizando influyen en el clima de las regiones ecuatoriales sólo en pequeño grado. Los fenómenos glaciares tuvieron lugar también en los trópicos.

5. Los débiles contrastes entre las zonas durante los períodos primitivos de la historia terrestre permiten afirmar que las circunstancias de la radiación solar eran completamente distintas de las actuales. Las pequeñas oscilaciones que los factores astronómicos pudieran acarrear en cuanto se refiere a la cantidad de calor solar recibido por la Tierra no implicarían anomalías climáticas tan importantes como las que acaecieron en el período glaciario pérmico.

También la influencia de la variación del contenido atmosférico en ácido carbónico y vapor de agua ha sido desechada por Milankovitch, por ser en todo caso pequeña sobre las constantes climatológicas.

§ 10

Problemas cosmogónicos

Sólo la última parte de la historia terrestre constituye el asunto de la Geología. Todo cuanto la Tierra ha sepultado en sus capas es objeto de la investigación por el geólogo. Esta limitación del campo de investigación es una desventaja para dicha ciencia. Mientras el investigador tiene ante sí solamente un fragmento postrero de la evolución terrestre, cae con facilidad en conclusio-

nes erróneas, ya que desconoce el conjunto de relaciones que su objeto de estudio tiene con otras materias que están fuera de su radio de trabajo. Cuando se tratan problemas referentes a los períodos pre-geológicos del desarrollo del globo terráqueo, el geólogo puede llegar a aficionarse a ellos. Entonces él escala el alto observatorio y entra en las cuestiones propiamente geológicas objetivas, y sin prejuicios. El estudio científico de los problemas cosmogónicos conduce a un resultado positivo ¹.

En virtud de observaciones particulares acerca de la estructura física del estado inicial de nuestro sistema planetario, todas las explicaciones de su evolución pueden ser repartidas en dos grupos. En un grupo está la supuesta reunión de corpúsculos sólidos, discretos (piedras, meteoritos), los cuales, obedeciendo a las leyes de su recíproca atracción, se mueven libremente, y sólo de vez en cuando sufren choques (hipótesis meteorítica; ideas de Kant, Faye, Ligondés, Chamberlin-Moulton, Jeans). La otra atribuye a la materia nebulósica primitiva estado gaseoso, sin que las partículas gaseosas tengan movimientos independientes, sino que supone que, además de las leyes de la atracción mutua, obedecen más o menos a las de la expansión (hipótesis nebular; teoría de Laplace). Tanto la hipótesis meteorítica como la nebular pueden apoyarse en hechos de observación. La existencia de nebulosas gaseosas demuestra la de masas de gases en el espacio, y la hipótesis meteorítica parece ser confirmada por los meteoritos errantes en nuestro sistema planetario y por las nubes de polvo cósmico que absorben la luz, pero no luminosas por sí mismas, las cuales verosímilmente se encuentran en diversos lugares de los espacios celestes.

Por numerosos motivos de índole variada se deduce que la hipótesis meteorítica no es adecuada para dar una

¹ Fr. Nölke, *El desarrollo de nuestro sistema planetario*. Berlín y Bonn, 1930.

explicación racional del desarrollo de nuestro sistema. Los más importantes son:

1. En el interior de una de las nubes de meteoritos que se extiende hasta la órbita de los planetas periféricos se mueven algunas piedras meteóricas con velocidades planetarias. La colisión entre ellas se efectúa, generalmente, con tal fuerza que la energía cinética producida por el choque se transforma en gran parte en trabajo destructor. Los choques sucesivos conducen, pues, no a una aglomeración de las piedras meteóricas, sino a una pulverización cada vez más completa de las mismas. Solamente si una de las masas estuviese en el caso de unirse a otra en virtud de la atracción mutua, tendría lugar un aumento de masa. Para que una masa que rebotase después del choque con sólo una velocidad de cien kilómetros por segundo se viese forzada a girar, necesitaría un planeta cuya densidad fuese igual a la de la Tierra, pero cuyo diámetro fuese mayor de cien kilómetros.

2. Reiteradamente se ha dicho que los planetas se enriquecen menos por las masas que sobre ellos caen que con las paralelas a ellos y cuya velocidad difiere poco, las cuales serían atraídas y acabarían por asociarseles. A esta idea se vuelve siempre de nuevo, y no puede por menos de reconocerse que es equivocada. Un corpúsculo que se acerca a otro de gran masa no se une a éste, sino que tan sólo experimenta perturbaciones en su órbita. Sólo excepcionalmente tiene lugar algún choque. Tan poco es el peligro de que los planetoides sean captados por los planetas Marte o Júpiter, próximos a ellos, como que las partículas que se mueven a alguna mayor distancia de los planetas sean absorbidos por éstos. Todavía debieran subsistir. En realidad el espacio entre las órbitas planetarias es casi vacío.

3. El número y la masa de los corpúsculos meteóricos que caen sobre la Tierra dan una escala de rapidez

del crecimiento de la Tierra, así como también de su edad. Diariamente caen sobre la Tierra aproximadamente diez millones de meteoritos, cuya masa en la mayoría de los casos es tan pequeña (de unos pocos miligramos), que en su camino a través de la atmósfera, por espacio de uno o unos pocos segundos, se volatilizan. Si se tiene en cuenta que los grandes meteoritos, escasos, que caen sobre la superficie terrestre, tienen una masa que puede alcanzar uno y más kilogramos, y siendo la masa media de cada uno de los diez millones de meteoritos 5 g.¹, un cálculo sencillo demuestra que en el transcurso de un año la superficie terrestre experimenta por cada centímetro cuadrado un crecimiento de masa de $3,8 \cdot 10^{-9}$; en otras palabras: suponiendo que la densidad media de los meteoritos es 5,5, el radio terrestre crecería a razón de $7 \cdot 10^{-10}$ cm. Ahora bien: no debe pensarse que las nubes de meteoritos, de cuyas partículas se habría formado la Tierra, hayan tenido durante la mayor parte del período evolutivo una densidad mucho mayor que hoy día. Luego su estado actual, por un mero cambio de masa, es intermedio a las nebulosas y los planetas; es decir, es alcanzado asintóticamente. Por consiguiente, la Tierra habría necesitado más de 100 billones ($=10^{14}$) de años para que se formase la masa de su corteza más externa con sólo 1 km. de espesor. Períodos evolutivos de trillones de años no existen, empero, en nuestro sistema, puesto que el Sol, en un lapso de tiempo mucho más breve, habría perdido su energía radiante; aparte otras consideraciones². La antigüedad del Sol se calcula en algunos miles de millones de años.

4. En las capas de la Tierra hasta hoy observables por el hombre no han podido encontrarse inclusiones de

¹ R. EMDEN, *Gaskugeln* (Esferas gaseosas), 1907; Teubner, Leipzig, p. 273.

² K. SCHWARZSCHILD, *Sobre el sistema de las estrellas fijas*, 1909; Teubner, Leipzig, p. 18.

meteoritos, a pesar de las influencias destructoras externas los habrían alterado menos que al gran número de organismos animales y vegetales interpuestos. Durante el período de formación de estas capas, que verosíblemente comprende centenares de millones de años (véase § 24) y siempre abarca una época importante del desarrollo histórico de la Tierra, la masa de ésta no ha experimentado, por tanto, ningún aumento notable mediante los meteoritos.

5. Frecuentemente los meteoritos tienen inclusiones de gases, hidrógeno especialmente. Ni oxígeno ni nitrógeno han sido hallados hasta hoy en sus componentes químicos. ¿De dónde proceden entonces los gases de nuestra atmósfera? ¿Y de dónde proviene el agua de nuestro océano?

De los argumentos expuestos dedúcese la imposibilidad de aceptar la hipótesis meteorítica. En conjunto constituyen, sin embargo, un material de comprobación, que aparece completamente desprovisto de perspectivas. Sólo queda, pues, la hipótesis nebular como fundamento de una explicación del desarrollo de nuestro sistema.

La hipótesis nebular puede apoyarse en algunos hechos registrados. Existen constelaciones, por ejemplo la de Orión, las Pléyadas, acerca de cuyo estado físico en relación con las masas nebulósicas que las rodean no puede casi dudarse. Las investigaciones astronómicas recientes han dado por resultado el conocimiento ulterior de un proceso evolutivo de las estrellas que comienza por una esfera luminosa, gaseosa y gigantesca. Los métodos, tanto los espectroscópicos como los directos, han dado para las estrellas gigantes un diámetro mucho mayor que el diámetro solar, sin que su masa sea mucho mayor que la del sol. El radio de Betelgeuze (α Orionis) es mayor que el radio de la órbita de Marte. El peso específico de numerosas estrellas gigantes difícilmente

alcanza a la millonésima parte de la densidad del Sol : deben ser, por tanto, verdaderas esferas gaseosas.

De que Betelgeuze sea una esfera gaseosa en la cual podría quedar incluida la órbita de Marte no puede deducirse, en cuanto a nuestro Sol, que éste haya tenido alguna vez un radio como el de la órbita de Neptuno ; y entonces la teoría de Laplace, en virtud de la cual los planetas se han ido separando sucesivamente del Sol, parece plausible en sí misma. Vamos a ver si, en virtud de una comprobación cuantitativa, es aceptable.

1. El lanzamiento de las masas planetarias tuvo lugar cuando el período rotacional del Sol era igual al período de traslación actual de los planetas. En virtud de la contracción, el Sol estaba estratificado, conforme a la Mecánica, la cual establece que el momento de rotación de un cuerpo abandonado a sí mismo y libre de influencias, es constante. Suponiendo una cohesión homogénea y una rotación uniforme, y siendo M la masa del Sol, s_0 su radio, ω_0 su velocidad angular, el momento de rotación F , es $2/5 M s_0^2 \omega_0$. Designando por s y ω los valores del radio y de la velocidad angular en un determinado tiempo anterior, resulta de aquella estratificación que $s_0^2 \omega_0 = s^2 \omega$; es decir, que puesto que la velocidad angular es inversamente proporcional al tiempo t de rotación, $s_0^2 : t_0 = s^2 : t$. Suponiendo $t_0 = 25 \frac{1}{3}$ días, y llamando t los períodos de traslación de cada uno de los planetas, el radio s es el radio que el Sol tenía cuando tuvo lugar la separación de los planetas. Para Mercurio resulta $s = 1,9 s_0$; para la Tierra $s = 3,8 s_0$; para Júpiter $s = 13 s_0$. Puesto que el radio de la órbita de Mercurio es $83 s_0$, el de la de la Tierra $210 s_0$, el de la de Júpiter $1110 s$, resulta que la masa del Sol propiamente dicho en el momento del desprendimiento de los planetas no alcanzó, con mucho, a la extensión de las órbitas planetarias. Si, a pesar de todo, tuvo lugar tal desprendimiento, tendremos que observar que todo el espacio que

desde el Sol primitivo se extendiera hasta las órbitas planetarias periféricas estaría ocupado por una atmósfera enrarecida, la cual lo envolvía como una cubierta extraordinariamente mayor en espesor que la altura de la atmósfera solar propiamente dicha y que el radio del núcleo. En concordancia con estos detalles ya Laplace establece que los planetas no se han formado a expensas de la masa solar, sino que se han separado de la atmósfera del Sol.

Si sobre el ecuador del Sol se fijan porciones de masas de las más altas capas atmosféricas, se comprende que el momento de inercia correspondiente a estas masas sólo puede determinar una pequeña fracción del momento de toda la atmósfera y una porción todavía más reducida del momento correspondiente al conjunto formado por el núcleo y la atmósfera solares. El momento del movimiento de traslación de una planeta es $mr^2\omega$, donde m representa su masa, y r el radio de su órbita. Llamando $f : F$ al cociente, resulta, teniendo en cuenta la ecuación de las superficies,

$$\frac{f}{F} = \frac{5m}{2M} \left(\frac{r}{c_0} \right)^2 \frac{t_0}{t}$$

Dando a las masas, radios y tiempos los valores conocidos, se encuentra para los 4 grandes planetas exteriores los valores 17, 7, 1'6 y 2. *Sólo el planeta Júpiter tiene un momento de traslación 17 veces mayor que el momento de rotación de la masa del Sol que ha quedado subsistente después de la separación de aquél*¹. Estos hechos no están de acuerdo con la hipótesis de Laplace por ningún concepto.

¹ La ecuación es válida suponiendo una cohesión homogénea y una rotación uniforme en el Sol. En realidad la densidad del sol, y seguramente también su velocidad de rotación, aumenta hacia el centro. La primera aminora el momento de giro, la segunda lo aumenta. Puesto que la influencia de aquella variación de densidades sobrepuja a la influencia de la variación de la velocidad giratoria, los valores consignados son valores mínimos.

2. Las órbitas de los 8 planetas forman con el ecuador solar los ángulos siguientes: $3,3^\circ$, $3,6^\circ$, $7,0^\circ$, $5,1^\circ$, $5,8^\circ$, $5,2^\circ$, $6,2^\circ$, $6,1^\circ$. Su inclinación con respecto a la órbita de Júpiter está medida por los siguientes ángulos: $6,3^\circ$, $2,3^\circ$, $1,3^\circ$, $1,3^\circ$, $0,0^\circ$, $1,2^\circ$, $1,0^\circ$, $1,3^\circ$. Las órbitas planetarias se agrupan, por consiguiente, mucho más cerca de alrededor de la órbita de Júpiter que del ecuador del Sol, mientras que, según la hipótesis de Laplace, tenía que ocurrir lo último. Laplace resuelve esta diferencia de posición atribuyéndola a la perturbación que la situación primitiva del eje solar sufrió a consecuencia del lanzamiento de las masas cometarias. Esta explicación no es admisible, pues es tan pequeña la masa de los cometas, que jamás han podido causar perturbaciones apreciables en el movimiento de los pequeños planetas y de la Luna, por cuyas proximidades han discurrido.

A la vista de las leyes físicas no cabe atribuir la formación de los planetas necesariamente a una contracción y arrugamiento del Sol, como consecuencia de su pérdida de calor; sólo queda la posibilidad de que sean producto de una génesis violenta. De esta opinión participan Chamberlin-Moulton, Jeans y Jeffreys¹. Se fundan en que las estrellas de nuestro sistema se mueven en el espacio siguiendo toda clase de direcciones, y por esto existe la contingencia de un mayor acercamiento entre dos estrellas. Si se aproximase un Sol nuestro, al principio desprovisto de planetas, a otra estrella, ésta provocaría en el Sol la formación de colosales penachos de marea, cuyas picudas masas, si la acción de marea fuese suficiente, quedarían permanentes. Se fragmentarían y redondearían en planetas, los cuales en parte

¹ TH. CHAMBERLIN, *The Origin of the Earth*, Chicago, 1925.
 I. H. JEANS, *Astronomy and Cosmogony*, Cambridge, 1928.
 H. JEFFREYS, *The Earth*, Cambridge, 1929.

seguirían en pos de la estrella, y en parte quedarían adscritos al Sol.

Esta hipótesis explicaría la armónica dirección traslatoria de los planetas y la situación casi idéntica de los planos de sus órbitas, pero no la *forma* de éstas, tan poco diferente de la circunferencia, hoy, pero que al principio debió ser más o menos elíptica. Los citados investigadores atribuyen la transformación de las órbitas en circunferencias a la acción de un medio resistente que rodeó al Sol y de las masas, no adheridas a él, procedentes de los residuos de los planetas al adquirir éstos forma esférica; masas que, al igual que los planetas, describen órbitas elípticas alrededor del Sol, pero que lentamente acabaron por ser circulares. Vamos a suponer, en efecto, que los planetas, girando en un medio tal, acabasen por adquirir forma esférica. Ello no empuja para que no pudiesen limpiar, mediante su fuerza de atracción, los espacios interplanetarios, casi purificados, del medio resistente. En virtud de la atracción ejercida también por los planetas mayores sobre las partículas desperdigadas entre sus órbitas, no es cosa de pensar que hubiesen de experimentar sino leves alteraciones en sus movimientos. La imposibilidad de dar una contestación satisfactoria al problema de la ulterior evolución de este medio cargado de partículas, que actualmente no existen en los espacios interplanetarios, constituye el escollo contra el cual se estrella la hipótesis de la marea. Para ello pueden aducirse los hechos astronómicos que la contradicen, y que enumeramos a continuación.

Todas las partículas que oponen resistencia a los planetas se concentran en virtud de su atracción mutua, aumentando su masa, como es consiguiente. El cálculo demuestra que si la excentricidad orbitaria, exagerada en los comienzos, disminuyese hasta no tener sino los actuales valores, casi toda la masa de los planetas debería proceder del medio material circundante. Si solamente

una parte de la masa circundante hubiese sido captada por los planetas, éstos habrían adquirido una masa mucho más considerable. Puesto que los espacios interplanetarios están hoy casi exentos de materia, deben de haber actuado fuerzas que los hayan «barrido» o aspirado. De cualquier manera que se haya pensado en este fenómeno de captación en sus detalles, sólo una cosa es admisible: que el punto límite de la evolución, ya que no fueron los planetas, únicamente el Sol pudo ser. Con el acercamiento al Sol, las partículas interplanetarias sufrieron la consiguiente aceleración en su movimiento. Englobadas al fin en el Sol, comunicaron a éste un enérgico movimiento giratorio. La formación, en el ecuador solar, de dos masas como sendos Júpiter, girando con él, impulsaron su incipiente movimiento de rotación. *Lo cierto es que el Sol giraría, pero con gran lentitud.* Que, en particular, la *Tierra* no ha sido influida por ningún medio resistente se deduce del hecho que las capas exteriores del globo terráqueo no revelan la existencia de partícula alguna que hubiese podido ser captada por él, de manera considerable (como, p. ej., meteoritos o gases cósmicos), a su paso a través del espacio.

Si en virtud de cuanto queda dicho ha sido preciso abandonar la hipótesis de las mareas y, con ella también, la idea de que los planetas hayan sido como arrebatados del Sol, queda todavía la posibilidad de que, al principio, existieran cerca del Sol masas propiamente capaces de privar de simetría a la nebulosa primitiva de nuestro sistema, como irregulares son numerosas nebulosas. En tal caso es posible que la idea de que el Sol y los planetas puedan proceder de una nebulosa cósmica que se fragmentaría en tiras o fajas, sea una hipótesis explicativa de la génesis de nuestro sistema, libre de graves contradicciones. Al analizar más adelante la hipótesis de la contracción, trataremos de sacar de aquella idea las consecuencias pertinentes.

LAS HIPOTESIS GEOTECTONICAS

La Geología, como ciencia experimental, puede ver con satisfacción sus resultados; pero la Geología teórica, en su camino hacia la búsqueda de correlaciones objetivas, está aún muy distante de su final. Ciertamente, antes se creyó que se había hallado ya el verdadero camino. La hipótesis de la contracción pareció ser apropiada para dar a las cosas observadas, en conjunto, un andamiaje. Pero cuando aparecen algunos nuevos elementos de observación que no concuerdan con éste, caemos en la incertidumbre. En lugar de dirigir la investigación hacia el encuentro de un fundamento más amplio a dicha hipótesis, otros investigadores trataron de minar todo el edificio, a fin de erigir otro en lugar suyo. Esto no se logró por completo, pero la consecuencia fué el florecimiento de una selva de hipótesis tan frondosa que es difícil hallar un sendero para no perderse en ella.

Con tan escasos materiales de observación sólo cabe esperar de la ciencia resultados de carácter únicamente provisional. Si ella ha dominado su material en cierto modo, las hipótesis meramente de trabajo ya no son suficientes para ordenarlo de una manera sinóptica y para tratarlo causalmente. Se esperan conclusiones ob-

jetivas, se quiere contemplar correlaciones ciertas y verdídicas, y no se contenta el espíritu con combinaciones imaginarias derivadas de meras ficciones. ¿Existe una hipótesis que se inserte francamente sobre los hechos observados y que se abra paso como un cuerpo de doctrina pleno de vitalidad? Esto sólo se decide mediante una comprobación metódica.

Los supuestos de cada una de las hipótesis acerca del lugar y naturaleza de las fuerzas que originan la transformación tectónica de la corteza terrestre son muy diversos; sin embargo, cabe agruparlos con arreglo a puntos de vista determinados. La hipótesis de la contracción los sitúa en el interior de la Tierra; las hipótesis de los resbalamientos (Gleitfaltung), tectónica y plutónica, en la corteza terrestre; la hipótesis de las corrientes profundas, en la capa inmediatamente situada bajo la corteza. Todavía existen otras hipótesis; por ejemplo, las de Pickering, Böhm, Kreibitzgauer, Wegener, Sinuroth, que suponen las fuerzas tectónicas bajo influencias exógenas (fenómenos inherentes a la rotación de la Tierra, acción de las mareas solar y lunar).

§ 11

La hipótesis de los resbalamientos

Ed. Reyer¹ dice, con respecto a ella, que en las montañas los estratos sedimentarios, en particular, están plegados. Para explicarlo opina que los sedimentos resbalan sobre el substratum y que, en su virtud, originan pliegues montañosos. Las montañas deben su formación a una fractura en la corteza terrestre, mediante la cual las masas se hunden hacia un lado en forma de gradas,

¹ *Orígenes de las deformaciones y de la formación de montañas*. Leipzig, 1812. — *Geologische Prinzipienfragen*. Leipzig, 1907.

en tanto que por un levantamiento lateral adquieren una posición inclinada. En las regiones de zócalo de los continentes es donde existen circunstancias óptimas para tales formaciones. Pues, en general, están inclinadas hacia las profundidades marinas, y además la permeabilidad de las capas disminuye la cuantía del frotamiento. Que un resbalamiento de masas de rocas ha ocurrido circunstancialmente lo indican los hundimientos que sobrevienen en las montañas; también han sido verificados por la investigación resbalamientos de carácter submarino.

La hipótesis de los pliegues por resbalamientos no ha hallado muchos partidarios. Las consideraciones que siguen dan una idea de su valor científico:

a) El plegamiento de masas que se hunden tiene lugar en un nivel más profundo que el nivel primitivo. De ahí se deduce que, antes del deslizamiento, los flancos de tales masas han originado ingentes ondulaciones del terreno, las cuales alcanzaron alturas superiores a las montañas, originadas en virtud de tal deslizamiento. Como causa originaria del abovedamiento de estas ondulaciones, señala Reyer los fenómenos térmicos del interior de la Tierra¹. Es preciso discriminar, pues, si las presiones productoras de plegamientos fueron de naturaleza estática o dinámica.

Si la energía cinética de una masa que se desliza hubiese originado la montaña, el fenómeno habría sido brevísimo, cuestión de algunos minutos. Los períodos orogénicos, empero, abarcan millones de años. Las capas sedimentarias que se deslizan se resuelven más adelante en algunos bloques y canchales, los cuales quedan revueltos de una manera salvaje. En virtud de los ple-

¹ H. Schardt y A. Penck han indicado la posibilidad de levantamientos de regiones extensas terrestres sobre el nivel del mar en virtud de presiones tangenciales. (*Trab. de la Soc. Suiza de Naturalistas*, 1906, y *Zeitschr. der Ges. für Erdk. zu Berlin*, 1908.)

gamientos la disposición interna no está, en cambio, alterada. Por estas dos consideraciones las montañas no deben su formación a presiones dinámicas, sino estáticas.

b) Para la altura de las ondulaciones se calcula un valor mínimo. El granito se rompe cuando soporta una presión lateral de 2.250 kg. por centímetro cuadrado. Ante una presión tangencial de este valor ha de procurar esquivarla lateralmente. En las montañas de plegamiento el espesor de las capas plegadas alcanza de 10 a 20 km. (en los Alpes, según A. Heim, 15 km.; en las Montañas Rocosas, según Kingsley, 18 km.). Si a 10-20 kilómetros de profundidad todavía las capas han de ser forzadas a desplazarse lateralmente, la presión tangencial sobre el peso de las masas ha de ser mayor. Alcanza a 3.000-6.000 kg. La presión total necesaria es, pues, de 5.000 a 8.000 kg. por centímetro cuadrado. Parece problemático que la resistencia de las rocas de las capas profundas plegadas por el desplazamiento lateral, y a temperaturas de 300°-6000°, esté algo disminuida, puesto que la plasticidad aumenta con las altas temperaturas; pero la presión en la profundidad disminuye¹. No exageremos si, de acuerdo con Sonder (op. cit. p. 227), suponemos una presión de 7.000 kilogramos por centímetro cuadrado.

La presión estática consignada puede medirse por la altura de una columna de piedra cuyo peso es igual a dicha presión. Alcanza 23 km. (densidad de las rocas, =3). Puesto que la presión deformadora de una masa que descansa sobre una superficie inclinada queda anulada en su mayor parte por la fricción, habría que suponer alturas considerablemente superiores a 23 kilómetros

¹ Comp. R. SONDER, Los diastrofismos de la cronología geológica a la luz de la teoría de la contracción (*Geol. Rundsch.*, t. 13, 1922, p. 222).

para las ondulaciones del terreno de las cuales deriva el resbalamiento. Su origen plantearía dificultades insuperables de interpretación ¹.

c) El deslizamiento sólo tiene lugar para inclinaciones muy restringidas de la infraestructura y en virtud de circunstancias de contacto completamente determinadas entre él y la masa que soporta. De ahí que sólo circunstancialmente tenga lugar en espacios muy limitados. Los plegamientos montañosos comprenden, empero, amplias zonas terrestres.

d) La Orogénesis está circunscrita a períodos geológicos determinados; el resbalamiento no está, sin embargo, sometido a ninguna ley.

e) Como argumento el más valioso e incontrovertible, aducen los defensores de la hipótesis de los resbalamientos la existencia de montañas cuyos arrugados es-

¹ A pesar de ser imposible aceptar la idea de presiones dinámicas, cabe, sin embargo, hallar algún espacio para unas indicaciones numéricas tocantes a aquéllas.

Parece evidente, al pronto, que si la porción negativa corresponde aproximadamente a la altura de la montaña o es algo mayor, la masa que se desliza tiene que ser menor que la masa montañosa. La presunción o sospecha de un espesor mayor de aquella porción negativa, así como la mayor presión que resulta de la supuesta presión estática, no representa ningún provecho para el razonamiento. Para un espesor negativo más pequeño, la masa que resbala tiene que ser considerablemente menor que la masa de la montaña, puesto que en otro caso su fuerza viva no podría realizar el trabajo de elevación necesario para producir el plegamiento montañoso; así, pues, toda la fuerza viva de la masa movida entra en juego sólo después de un plegamiento subsiguiente en su lado frontal, cuando la presión dinámica $p = mv$ no rebasa la medida del valor en cuya virtud las masas de rocas comienzan a adquirir plasticidad. Si la presión es superior a este valor mv , la masa en movimiento se deforma, no sólo en el lado frontal, sino también en la porción media, plegándose en conjunto. De los valores admisibles de $p = mv$ resultan, en concordancia con la ecuación energética consignada en § 21, valores de trabajo que difícilmente son suficientes para acumular una montaña de 100 km. de base por algunos centenares de metros de altura.

tratos descansan sobre otros estratos que están sin plegar. Pero la causa de los ejemplos que se citan no está de ningún modo clara. Según L. Kayser, los casos que presenta von Reyer (Wesergebirge, alrededores de Oslo) no están elegidos con criterio adecuado. Más clásico es el ejemplo del Jura. Pero toda vez que las capas profundas sólo en parte están a la vista, queda todavía la posibilidad de que estas capas, en otros lugares no accesibles al estudio, hayan experimentado también el plegamiento por sí o al hacerse solidarias del arrugamiento de las capas superficiales al resbalar sobre las citadas capas profundas.

Los fenómenos de resbalamiento no están, ciertamente, agotados (por ejemplo, harían posible las grandes cobijaduras alpinas); pero no son la *causa* de los plegamientos, sino que se subordinan a ellos como *fenómenos concomitantes*.

f) El hecho de que en la mayoría de las montañas el arrugamiento alcanza grandes profundidades contradice la hipótesis de los resbalamientos.

g) Si las masas sedimentarias resbalan sobre substratums inclinados, deben presentarse roturas en sus porciones posteriores, y roturas en forma de fosas, cuyo ancho total ha de corresponder, aproximadamente, al acreamiento transversal que las capas experimentan a causa del plegamiento. Pero tales fosas paralelas a los pliegues no se ven por parte alguna. No hay duda, en efecto, de que detrás de las cordilleras, en su postpaís, existen bloques corticales fracturados, como demuestran las masas magnéticas que han subido a la superficie. Los empujes producidos por resbalamientos no originan territorios despedazados, sino huecos entreabiertos, y éstos es inútil buscarlos en el postpaís de las montañas plegadas. La opinión que sostiene que puedan hallarse cubiertos por el mar o por terrenos de acarreo, sueltos, sería tentadora, pues evitaría el peligro de la comprobación. Como las fajas de grandes fondos oceánicos están delante

de los plegamientos, no queda por aquí resquicio para sostenerla.

g) Recientemente la hipótesis de los resbalamientos ha recibido un nuevo defensor en E. Haarmann¹. Este autor establece dos categorías de fenómenos tectónicos: tectogénesis primaria y tectogénesis secundaria. Considera como tectogénesis primaria la formación de elevaciones, gibas, tumores, es decir, movimientos de la corteza en sentido vertical; como tectogénesis secundaria, tiene lugar lo que acompaña a los flancos de los tumores, es decir, los empujes en dirección horizontal. Atribuye la aparición de los tumores a corrientes del magma subcrustal (véase § 14). Nosotros nos limitamos, en vista de eso, a probar si lo que Haarmann aduce como explicación de los fenómenos de resbalamiento aumenta su grado de verosimilitud.

Destaca Haarmann que los sedimentos marinos, sobre todo inmediatamente después de su formación, quedan fuertemente empapados de agua, y a menudo son plásticos, o adquieren plasticidad algunas de sus capas por efecto de la presión, lo cual acentúa su facilidad de deslizamiento. De esta suerte cree poder afirmar que bastan leves inclinaciones y superficies relativamente pequeñas para que las masas puedan resbalar o deslizarse. Sobre esto hay que observar que la mayoría de los sedimentos plegados de las montañas no aparecen arrugados como si se tratase de masas pastosas. Si los sedimentos fuesen tan blandos que se plegasen ya con unos pocos kilómetros de altura de resbalamiento, las montañas de kilómetros de elevación, formadas por el estrujamiento de los sedimentos, se habrían vuelto a hundir. Si, no obstante, los sedimentos sometidos al plegamiento se dispusiesen en paquetes superpuestos, como ocurre generalmente, alcanzarían tal compacidad que sólo en virtud de un resbalamiento casi desprovis-

¹ E. HAARMANN, *Die Oscillationstheorie*, Stuttgart, 1930.

to de fricciones podrían erguirse tumores de más de 20 kilómetros de altura. El hecho de que las rocas eruptivas, ya enfriadas, aparezcan ocasionalmente plegadas, prueba en todo caso que la compacidad de los sedimentos plegados durante las orogénesis no se diferencia mucho de la que tienen los sedimentos actuales. Sólo podrían existir los centenares de kilómetros de cobijaduras alpinas si los caparzones hubiesen alcanzado un alto exponente de compacidad o rigidez.

R. W. van Bemmelen¹ ha expuesto en numerosas publicaciones argumentos en pro de la teoría de las «Undaciones»: en los bordes continentales, especialmente en lo profundo de los geosinclinales, el magma, sometido a procesos de diferenciación (división de sus componentes fundamentales en Sial y Sima), experimentaría un aumento de volumen, capaz de dar lugar a elevaciones, undaciones u ondulaciones, las cuales, continuando aquellos fenómenos diferenciativos, originarían en el flanco frontal de esas ondulaciones paquetes de estratos, que a su vez se ondularían y replegarían sobre sí mismos; de este modo se explicarían los mantos o caparzones empujados por el esfuerzo orogénico. Puesto que las capas sólo pudieran resbalar si encontrasen sitio para ello o si se apilasen unas sobre otras, para que esa hipótesis fuese viable sería menester que, en último caso, el esfuerzo impulsor de las capas sedimentarias aumentase constantemente, cosa que no es posible, porque la onda va siendo elevada conforme se ensancha; pero en el primer caso, es decir, cuando el resbalamiento se supone sin trabas, cualquier irregularidad de la superficie de resbalamiento (gibas locales, desigualdades en la inclinación de los flancos) alteraría las masas deslizantes, fragmentándolas en escudos par-

¹ R. W. van Bemmelen, Über die möglichen Ursachen der Undationen der Erdkruste. *Proc. Kon. Wetensch. Amsterdam*. Bd. 35, 1932, p. 392.

ciales, por lo que no quedaría ninguna cubierta o manto continuo.

§ 12

La hipótesis térmica ¹

Los geosinclinales son regiones de hundimiento. La tendencia al hundimiento es reforzada por el depósito de nuevos sedimentos. Los sedimentos alcanzan altas temperaturas en las grandes profundidades. En consecuencia, se dilatan. Las paredes limítrofes de los geosinclinales no permiten una dilatación lateral. Ha de tener lugar ésta, pues, en dirección perpendicular, y por cierto en un punto de la concavidad donde los sedimentos opongan la menor resistencia. Aquí aparece un pliegue anticlinal; se desmembra con el tiempo en otros pliegues menos enhiestos.

La hipótesis ha sido objeto de comprobaciones analíticas por parte de K. Andréé ². Completaremos sus argumentos con algunos nuevos.

a) Que tiene lugar un recalentamiento de los sedimentos que se hunden, es cierto. Pero de ahí no cabe deducir que sea suficiente para originar un levantamiento. Si los sedimentos se calientan y dilatan en la profundidad, ello sólo evitará que el hundimiento del geosinclinal prosiga, pero no producirá una asociación de un hundimiento y un levantamiento. Tan pronto como la

¹ Expuesta por M. Reade, *El origen de las cordilleras*, Londres, 1886. *The Evolution of Earth Structure*, Londres, 1909. Partidarios de la hipótesis son F. v. Richthofen en Neumayr, *Anteilung zu wissenschaftlichen Beobachtungen auf Reisen*. 3. Aufl., 1906. E. Dacqué, *Grundlagen und Methoden der Paläogeographie*, Jena, 1915.

² *Über die Bedingungen der Gebirgsbildung*, Berlin, 1914.

dilatación térmica compensa el ahondamiento, se produce un estado de isostasia que tiende a persistir.

Sólo cuando el hundimiento se efectúa de una manera tan rápida que el recalentamiento resultante es capaz de seguir su misma marcha, las isoterms no adoptan, por tanto, ninguna forma convexa hacia abajo en las capas del geosinclinal, sino que se desplazan hacia arriba¹, puede tener lugar una subsiguiente dilatación y levantamiento de las capas. Esta opinión no es admisible, pues el ahondamiento del geosinclinal se efectúa, en general, tan lentamente que las isoterms no pueden adoptar ninguna configuración anormal hacia abajo.

b) Para la explicación no es aceptable que los sedimentos en vías de hundimiento en grandes profundidades experimenten grandes presiones y se compriman con mayor intensidad, probablemente que la cuantía en que se dilatan por efecto del recalentamiento. Además, a causa del recalentamiento y la presión, los sedimentos se metamorfizan, pasando a pizarras cristalinas, con pérdida de volumen.

c) Es de presumir que el recalentamiento de los sedimentos aumentará por la acción del magma que los penetra. Pero no en todas las montañas de plegamiento

¹ Como nuevo origen del aumento de temperatura se ha aducido la producción de calor por las materias radioactivas que deben abundar en los sedimentos. Cuanto con ello se relaciona se comprende que va contra el origen nombrado. Para la hipótesis es viable la idea de que las capas sedimentarias, a causa de su hundimiento, al principio presentan una temperatura inferior a la normal, y que por el recalentamiento ulterior se dilatan y se desplazan hacia arriba. El calor procedente de las inclusiones radioactivas haría que dichas capas adquiriesen, como al principio, alta temperatura, por lo cual disminuiría la rapidez de su hundimiento, debilitándose el contraste térmico frente a los alrededores y, en su virtud, la fuerza ascensional de los sedimentos. Además, según Joly (*Nature*, t. 78, n.º 2.028, p. 456), el contenido de las rocas sedimentarias en materias radioactivas es menor que el de las rocas eruptivas. En los depósitos abisales sucede lo contrario.

aparecen intrusiones magmáticas. Según A. Heim, faltan en los Alpes, por ejemplo. Allí sólo las masas cristalinas están plegadas, lo mismo que los sedimentos. Algunos pliegues montañosos, por ejemplo el Jura suizo, no tienen núcleo cristalino alguno.

Además, las intrusiones siempre tienen carácter local, por lo que no pueden explicar la dirección en bandas que las montañas de plegamiento ofrecen en conjunto.

d) Dacqué (en otro lugar, p. 142), en apoyo de R. Lachmann¹, dice que, por lo menos en las altas cordilleras, que tienen un núcleo cristalino, los procesos cristalocinéticos han tomado parte importante en el fenómeno orogénico. A causa de la perturbación isostática en los geosinclinales tiene que producirse un movimiento de diferenciación en las masas magmáticas que se encuentran bajo los sedimentos; y si los sedimentos son afectados por ella, se pliegan. Nos parece que tales causas son completamente baladíes.

e) Según la hipótesis térmica, la causa u origen de los pliegues deriva del hundimiento del geosinclinal y de la prosecución del proceso sedimentario; es decir, es un fenómeno continuo. Por tanto, los sedimentos más antiguos debieran plegarse primero, y los recientes, siempre después. Pero las capas de los pliegues montañosos han sido afectadas simultáneamente en intensidad y en totalidad durante el proceso orogénico.

f) El desarrollo tectónico tiene carácter cíclico. Además, los plegamientos no han sido simultáneos en todos los ámbitos de la Tierra. Para ambos hechos la teoría térmica no da ninguna explicación.

g) Las montañas de plegamiento se han originado, según la hipótesis térmica, por hinchamientos. Es decir, como por ondas que, no obedeciendo más que a la:

¹ Über den Bau alpiner Gebirge. *Zeitschr. d. Deutschen Geol. Ges.*, t. 65, 1913, p. 157.

gravidad, tienden a desplazarse horizontalmente, con lomas engrosadas y valles profundos y angostos. Los pliegues están, empero, trastornados, comprimidas las lomas y estirados a lo largo los valles, como obedeciendo a presiones horizontales ¹ (empujes).

h) Es discutible si las capas rocosas rígidas que se hinchan pueden adoptar la forma de pliegues. Es más verosímil que se rompan y se acumulen o apilen a guisa de canchales. Particularmente, la explicación de los pliegues por una hinchazón constituye grave contratiempo para la hipótesis. Su origen obedecería a una causa exógena, y en cambio está fuera de duda que se trata de un fenómeno endógeno, puesto que los sedimentos sólo a una determinada profundidad adquieren propiedades plásticas, y hasta allí no pueden sufrir desplazamientos fluidales.

ñ) A la vista de un número de ejemplos cree Reade ² poder demostrar que las variaciones térmicas citadas son capaces de producir las más altas cordilleras de la Tierra. Llega a esta conclusión con auxilio de prolijas deducciones inadmisibles. Por de pronto, afirma que la dilatación cúbica de la masa recalentada sólo se traduce en una dilatación en sentido vertical, hacia arriba, puesto que las paredes inflexibles que la circundan contrarrestan la expansión a lo largo y transversalmente. La suposición de paredes mutuamente perpendiculares jamás se cumpliría. Los sedimentos que descansan sobre flancos inclinados de una depresión se desplazarán algo flanco arriba cuando experimenten una dilatación horizontal, de igual modo que la costra de hielo de un estanque remonta las orillas suaves. Para el movimiento de avan-

¹ E. KAYSER, *Lehrbuch der Geologie*, 5.^a edición, 1918, I tomo, p. 975.

² *The origin of Mountain Ranges*, p. 109; véase también E. Kayser, op. cit., p. 974.

ce no es adaptable la triple dilatación térmica, sino la dilatación longitudinal sencilla.

Además es de esperar que, en virtud de una dilatación de las capas profundas, se levante todo el caparazón sedimentario, y no una pequeña zona tan sólo. Para explicar esto se ha dicho que los sedimentos se traban sólidamente con los flancos del geosinclinal, por lo cual no podría efectuarse un movimiento ascensional de conjunto. También, si esta suposición muy inverosímil pudiera ser valedera, sólo las zonas marginales estarían impedidas en su movimiento ascensional, pero no las centrales; es decir, la concavidad se abovedaría en casi toda su amplitud. Este abombamiento no podría tener lugar, por tanto, si los sedimentos soportasen en su superficie una presión de arriba abajo lo suficiente intensa. Exceptuando la presión atmosférica, tan débil, tal presión no existe.

Finalmente, Reade admite una inflexión de las isothermas excesivamente grande, ya que calcula diferencias de temperatura de 500° en sentido horizontal, lo cual corresponde a un hundimiento de las isothermas de 17 kilómetros, es decir, todo el espesor de los sedimentos plegados en los Alpes y en las Montañas Rocosas.

Si el cálculo se repite con valores adecuados, el resultado de la hipótesis tampoco es más halagüeño. Si se tienen en cuenta las suposiciones inverosímiles de que las capas sedimentarias se sueldan con las paredes del geosinclinal y su superficie no se aboveda en conjunto, sino que sólo es una pequeña zona lo que se hincha, podría producirse una alineación montañosa en razón de diferencias térmicas de 200° en sentido horizontal, que corresponden a una incurvación de las isothermas de casi 7 kilómetros en una depresión de 1.000 km. de ancho y rellena por un espesor de sedimentos de 15 km.; esta alineación no tendría más de 3 km. de altura por 20 km. de ancho, mientras que con un ancho de 100 km. difícil-

mente alcanzaría 600 metros (valor medio del coeficiente de dilatación lineal de las rocas = 0,00001)

§ 13

La hipótesis de las corrientes profundas

Esta hipótesis no localiza en las capas más extensas de la corteza terrestre las fuerzas capaces de originar los fenómenos tectónicos, como lo hace la hipótesis térmica, sino que las sitúa en las grandes profundidades de la corteza rígida, en la zona de fluidez de las rocas. Según O. Ampferer¹, es verosímil que las montañas de plegamiento sean elevaciones, a modo de tiras, más o menos intensas, de las cuales parten lateralmente corrientes de materia fluida. Estas elevaciones pueden proceder lo mismo de una expansión del substrátum que de un hundimiento de las mismas zonas inmediatas. Además pueden entrar en juego corrientes de masas recalentadas. Las corrientes laterales ocasionan pliegues intensos.

La hipótesis de Ampferer ha sido ampliada especialmente por K. André². El equilibrio gravitativo de las zonas profundas es alterado por los cambios de volumen, y a causa de esto en las masas pétreas plásticas aparecen

¹ Über das Bewegungsbild von Faltengebirgen. *Jahrbuch d. k. k. geol. Reichsanstalt*, t. 56, 1906.

² *Sobre las condiciones de la formación de las montañas*, Berlín, 1914.

La idea fundamental de la hipótesis de las corrientes subcorticales se halla ya en la antigua «Hipótesis de la Isostasia», de C. F. Dutton (On some of the greater problems of physical Geology, *Bull. of the Phil. Soc. of Wash.*, XI, 1892). En las regiones marginales de los continentes los sedimentos que descansan sobre el fondo del mar hacen que se hundan los escudos continentales. El fondo del mar aumenta de carga, en tanto que el escudo continental se aligera. Si tiene lugar un movimiento de restableci-

corrientes que restablecen el equilibrio isostático, las cuales, si tienen lugar en zonas geosinclinales, producen el plegamiento montañoso. La dirección de la corriente es resultante de la altura relativa de las zonas inmediatas a la deformación cortical; en su virtud existen un antepaís y un postpaís. Sobre el substratum fluido en movimiento la masa de sedimentos que lo recubren se pliega a consecuencia de la soldadura entre las zonas indiferentes y las móviles. En la cicatriz entre el postpaís y la masa que se pliega a su empuje se insinúan masas eruptivas (op. cit., p. 54). La dirección del movimiento de las masas fluidas determina la estructura unilateral de los pliegues montañosos. Puede también producirse un hinchamiento del antepaís (página 64). Las corrientes profundas sólo originan fenómenos orogénicos en las zonas labiales de los geosinclinales; en las regiones estables de los continentes aparecen movimientos epirogénicos (p. 73).

Sobre la causa a que puedan atribuirse los levantamientos y hundimientos del substratum plástico, Ampferer se expresa con dificultad. Según Andréé están, en primer término, los fenómenos de cristalización, con aumento de volumen, que tienen lugar en la profundidad. Alude a F. v. Richthofen¹, quien, para poder explicar los fenómenos volcánicos, expone la idea de que con la lenta y completa cristalización de silicatos plástico-fluidos bajo la corteza sólida tiene lugar un aumento de volumen; y además a las investigaciones de G. Tammann² acerca de la actitud de algunas sus-

nimiento de la gravedad, el substratum plástico del fondo del mar situado bajo la zona continental periférica es comprimido. Los sedimentos que descansan sobre ella siguen el movimiento del substratum y acaban por plegarse.

¹ Über den Ursprung der vulkanischen Gesteine. *Zeitschr. d. Deutsch. Geol. Ges.*, t. 21, 1869, p. 10.

² *Kristallisieren und Schmelzen, ein Beitrag zur Lehre der Änderungen des Aggregatzustandes.* Leipzig, 1903.

tancias al cristalizar y fundirse bajo presiones elevadas. Pero, según los trabajos de Tammann, el punto de fusión de la sal de Glauber cuando la presión aumenta sólo llega hasta un límite fijo, llamado «punto máximo de fusión». Si la presión es todavía más fuerte, ese punto vuelve a descender; hay, pues, incremento de solidez, y dilatación al mismo tiempo. Tammann cree poder decir que las rocas que adquieren fluidez por fusión tienen propiedades análogas a las de la sal de Glauber. Según él, si la Tierra se enfría, las rocas situadas a una determinada profundidad adquieren estructura de agregado. Verificándose todo esto de una manera paulatina y propagándose los centros de cristalización sobre grandes regiones del interior de la Tierra, sobrevienen variaciones seculares del nivel terrestre. Si la transformación se opera rápidamente y en confines pequeños, ocurre una sacudida sísmica.

G. von dem Borne y M. Reade¹ han emitido la idea de aumentos locales de volumen en el interior de la Tierra para explicar la formación de las montañas. También Andréé está persuadido de que el aumento de volumen puede ser la causa no solamente de las erupciones volcánicas, sino también de los levantamientos seculares (epirogénicos), e incluso también de cualesquiera movimientos de elevación a los cuales Ampferer aplica su teoría de los fenómenos de resbalamiento y corrientes profundas (op. cit., p. 46.)

La idea de que el magma alcance, como la Sal de Glauber, un punto máximo de fusión, es todavía problemática. Aunque fuese cierta, no sería suficiente, según B. Tams², para explicar los hinchamientos sub-

¹ G. v. D. BORNE: *Die physikalischen Grundlagen der tektonischen Theorien*. Gerlands Beiträge zur Geophysik, t. IX, p. 378.
M. READE: *The Evolution of the Earth Structure*, Londres, 1923. Confr. § 12.

² *Einführung in die Geophysik* von A. Prey, C. Mainka, F. Tams. Berlin, 1922, p. 271.

corticales, puesto que en la profundidad, donde reinan las máximas temperaturas de fusión, no existe todavía la suficiente presión para poder endurecer el magma.

b) Los movimientos fluidales prueban que en la infraestructura hay una tendencia al restablecimiento del equilibrio isostático. La intensidad de la tensión tangencial producida por las corrientes profundas que arrastran consigo a los fragmentos de la corteza, depende, por consiguiente, de la altura del hinchamiento. Es igual a la presión estática producida por el peso de una columna de rocas de igual elevación. Ya hemos discutido antes (véase § 11) cuán grande ha de ser el esfuerzo en la corteza para que puedan ser plegadas capas sedimentarias de 10 hasta 20 km. de espesor. Alcanza a unos 7.000 kg. por centímetro cuadrado; y la altura correspondiente a tal presión ha de ser de 23 km. Sería difícil admitir como auténtica la producción de tan importantes hinchazones en el substratum plástico de la corteza.

c) Puesto que los hinchamientos bajo la corteza sólo son de carácter local siempre, es difícil atribuirles una legitimidad. Pero entonces no hay ningún fundamento comprobable de que los geosinclinales estén plegados siempre sólo en una dirección paralela al borde continental. En virtud de las grandes dilataciones de muchos sinclinales, también hubieran podido aparecer pliegues localizados en ciertos puntos, atravesando a aquéllos en las más diversas direcciones. C. E. Dutton da una explicación de las direcciones legítimas de los plegamientos, y consiste en que las corrientes profundas que discurren entre los geosinclinales, en los cuales la sedimentación prosigue, y las regiones aledañas que en virtud de la denudación experimentan una descarga, se opera un equilibrio isostático; pero la fuerza plegadora de estas corrientes es todavía menos que la de las ondulaciones del suelo aplanantes.

d) La hipótesis de las corrientes profundas implica

también una réplica a la hipótesis de los deslizamientos. Si las capas de los geosinclinales se ondulan y pliegan, debieran aparecer amplias fosas en su hinterland o postpaís. Es cierto que existen territorios fracturados inmediatos a las cordilleras de plegamiento, pero en parte alguna aparecen amplias fosas.

e) La sucesión cíclica de los fenómenos orogénicos y epirogénicos permanece oscura.

La hipótesis no parece suficiente a su propio mantenedor. Ampferer ha ampliado nuevamente sus explicaciones¹. Opina que, circunstancialmente, las corrientes inferiores hacen sentir también sus efectos en las zonas alejadas de la zona de plegamiento y ocasionan grandes desplazamientos. Esta opinión se aproxima a la de Wegener (véase § 23). También otros investigadores, particularmente Schwinner y Holmes², han desarrollado con amplitud la hipótesis en cuestión. Estos autores comparan las corrientes de la infraestructura plástica de la corteza con las corrientes atmosféricas. En determinados puntos, considerados como lugares focales, o de origen, el magma afluye hacia ellos, subiendo; en otros puntos, el magma desciende, y de esta suerte se cierra el círculo con corrientes ondulatorias. Las masas situadas inmediatamente debajo de la corteza, y afectadas por esas corrientes, tienen que ser arrastradas, y han de plegarse en las zonas bajo las cuales se hunden.

Expuesta sobre nuevas bases, la hipótesis parece haber ganado en solidez. Los argumentos esgrimidos en contra suya quedan destruidos en la mayor parte. Pero surgen otras dudas. Prescindiremos de las críticas de

¹ Consideraciones geométricas acerca de la estructura de los Alpes. *Mitt. d. Geol. Ges. in Wien*, XII, 1919.

² R. SCHWINNER, Vulkanismus und Gebirgsbildung, ein Versuch. *Zeitsch. für Vulkanologie*, Bd. 5, 1920.

A. HOLMES, Radiaktivität und die thermische Geschichte der Erde. *Die Naturwissenschaften*, 19 Jahrgang, 1931, p. 73.

inegable valor hechas desde un punto de vista teórico, y cuya admisibilidad está pendiente de las incesantes investigaciones de carácter geofísico encaminadas a explicar las corrientes profundas invocadas. Nos concretamos, por tanto, a examinar en qué condiciones desarrollan tales corrientes subcorticales las actividades a que dan origen.

1. Según esta hipótesis, la corteza está adherida a su infraestructura en virtud de la fricción con ésta. A consecuencia de esta especie de engranaje, las corrientes profundas tienden a transmitir el movimiento a las regiones de la corteza que gravitan sobre ellas. Entonces se presentan dos posibilidades: o la trabazón entre la corteza y su infraestructura es tan sólida que ambas constituyen *un solo cuerpo*, o la corteza es un cuerpo *independiente* y sigue a las corrientes en la medida de la mayor o menor intensidad de los empujes que tales corrientes producen, y de la resistencia frontal. En el primer caso la corteza sería arrastrada por la corriente hacia la profundidad, y sus masas perderían, de esta suerte, sus rasgos típicos, por lo cual, persistiendo el movimiento desplazatorio, se formaría una nueva corteza a expensas de las masas profundas, con los caracteres inherentes a éstas. Pero como esto lo contradicen los hechos geológicos, hay que acudir al segundo supuesto. Al resbalar las masas en flujo que están debajo de la corteza, procuran hacer a ésta participe de su movimiento, y si las fuerzas actuales logran sobrepasar un determinado valor, pueden producir un desplazamiento. La intensidad de una fuerza que actúa sobre una zona costera o litoral depende de la dirección de éste en relación con el sentido de la corriente infracortical, y con la longitud que el litoral tenga. Cuanto más corta sea la costa o más pequeña en la dirección frontal, menor será la presión que la corriente infracortical ejerce sobre ella. La fuerza desplazatoria sólo puede alcanzar el valor eficaz cuando

el borde continental tiene una longitud determinada y suficiente. La superficie de ataque afecta, pues, a una zona más o menos amplia, más allá de la cual se extiende el resto, al que no alcanza la fuerza desplazatoria. Esta zona tiene que aparecer por doquier, pues si no, no actuaría ninguna acción de esta índole. Pues bien: se busca inútilmente en todas las cordilleras plegadas una zona inalterada entre las áreas de pliegues y de fractura. Ambas aparecen en íntimo contacto, y de esto se infiere que su formación nada ha tenido que ver con corrientes infracorticales.

2) Atendiendo a la manera de originarse, las corrientes infracorticales pueden ser más sencillas. Pueden o bien proceder de las grandes profundidades, o pueden ser resultado de impulsos producidos por irregularidades locales de la corteza terrestre. En el primer caso, la zona productora de estas acciones endógenas se define como una región de hundimiento o elevación. Siendo su situación independiente del aspecto que pueda presentar la corteza, las corrientes, no sometidas a ninguna condición que dé lugar al desarrollo independiente de las zonas corticales, actuarían en sentido orogénico. Las corrientes podrían actuar *hacia* los geosinclinales lo mismo que *desde* los geosinclinales, y el resultado sería que los fenómenos de plegamiento no tendrían lugar en los geosinclinales, sino que también se manifestarían en el *interior* de los escudos corticales.

Como se comprende fácilmente, no es necesaria una fuerza muy grande para que un bloque que se fractura sea asido de un geosinclinal localizado sobre esa zona de ruptura. Si se designa por D_s y Z_s la presión y la resistencia de las rocas del bloque o escudo, y por D_g y Z_g la presión y solidez análogas de los sedimentos del geosinclinal, el valor de la fuerza productora del abombamiento del geosinclinal para plegarlo una vez que en medio de la fractura del escudo haya sido vencida

la resistencia de las rocas de éste, tendría que ser igual a $D_g + Z_s$ y el valor de la fuerza abombadora que actúa en el seno del escudo, y que lo deforma, es $D_g + Z_s$. La resistencia de los materiales a desplazarse es menor que la resistencia a la presión, pero, en general, es superior a la mitad de esta última. Los valores de ambas sumas no son, por consiguiente, muy diferentes entre sí. Para producir la modificación tectónica de una tabla o escudo cortical sólo se precisa una fuerza poco intensa cuando se trata de producir fenómenos de plegamiento; pero entonces los escudos corticales con zonas internas intactas tectónicamente y con geosinclinales detrás debieran abundar casi tanto como los geosinclinales plegados de los territorios que están en el borde anterior del escudo deformado.

Para soslayar las consecuencias indicadas, imagina todavía Hohnes corrientes de otra clase, las cuales dependen de la calidad de la corteza y son más eficaces que las corrientes de la índole de las anteriormente imaginadas. Estas corrientes se producirían en virtud de la radioactividad, que es relativamente más intensa en las rocas continentales que en las rocas suboceánicas, y se moverían radialmente desde el centro de los escudos continentales hacia el exterior. Desgarran a éstos, fragmentándolos, y estrujan los trozos hacia los geosinclinales, obligándolos a arrugarse. Pero tampoco es aceptable esta opinión. Porque si, realmente, las corrientes subcorticales obedeciesen a esa causa, su intensidad tendría que decrecer rápidamente después del desgarramiento del escudo, toda vez que su zona de origen, que entonces empuja como zona de fractura situada en el borde continental, se hundiría y actuaría a guisa de pilar resistente, que produciría debajo del fragmento de escudo cortical resultante nuevos focos de corrientes.

3) El esfuerzo compresor que las corrientes profundas producen en los escudos corticales depende de la

dilatación longitudinal del escudo, que llamaremos a , de la fricción interna μ de las masas que se desplazan, y de la velocidad v de la corriente (véase § 7). La fuerza necesaria para el plegamiento de un espesor de sedimentos está determinada por la solidez de las rocas y el espesor de la corteza, espesor que en los comienzos de la evolución geológica era indudablemente menor que en los posteriores tiempos: En virtud de lo que dijimos en el apartado D), se infiere que la fuerza plegatoria tiene condiciones muy restringidas. Todo exceso considerable del valor necesario para producir el abombamiento o alabeamiento produciría condiciones bajo las cuales toda la corteza quedaría triturada, y el restablecimiento del equilibrio después de aquél daría lugar al desarrollo de nuevos empujes. Como no ocurre ni lo uno ni lo otro, infiérese el grado de verosimilitud que tienen los valores a , μ y v , a pesar de no mantenerse dentro de intervalos muy estrechos, mientras que la totalidad de los tiempos de la evolución geológica son tan imprecisos en su duración, que la presión alabeadora resultante alcanza el límite necesario para acarrear plegamientos, pero no lo rebasa, por lo cual su certeza corre parejas con la verosimilitud de la hipótesis de las corrientes profundas. Consideraciones de inexcusable valor conspiran contra la hipótesis en cuestión.

4) E. Kraus, aplicando por encima de todas las otras hipótesis ésta de las corrientes profundas, cree poder explicar los grandes mantos de corrimiento alpinos¹. Considera este autor imposible que las cobijaduras hayan corrido por encima de los Alpes centrales; más bien deben interpretarse como si por debajo de la capa de recubrimiento es el material profundo lo que ha resbalado, de manera que ha quedado obligado a ocupar un espacio más restringido.

¹ E. KRAUS, Das Wachstum der Kontinente nach der Zyklus-theorie. *Geol. Rundschau*, Bd. 19, 1928, p. 65.

Como el espesor de la capa de recubrimiento no es más que de algunos kilómetros y como por otra parte sólo en profundidades de 50 km. por lo menos pueden tener lugar corrientes infracorticales en el seno de las rocas dotadas de plasticidad, resulta que la capa en cuestión no descansa inmediatamente sobre la corriente, sino que se encuentra separada de ésta por una gruesa capa de corteza sólida. Si esta capa se hallase unida con la corriente, sería arrastrada por debajo del manto de recubrimiento, y quedaría separada de aquélla en la zona de hundimiento. Por tanto, en tal caso tiene lugar un deslizamiento a lo largo de una superficie localizada en *el interior* de la corteza sólida. La dificultad que el defensor de la hipótesis de las corrientes infracorticales creyó poder superar no es, de consiguiente, más pequeña que las que se levantan ante los patrocinadores de cualesquiera otras hipótesis. Por lo demás, esta dificultad no es, de ninguna manera, invencible. Es posible remediaria suponiendo que la roca, que goza de plasticidad debido al calor de fricción en ambos lados de la superficie de contacto, tiene una superficie de resbalamiento que posee los caracteres de una superficie engrasada o lubricada. Pero el hecho de que en la zona central de muchas cordilleras plegadas; es decir, que en las zonas de hundimiento correspondientes a las corrientes infracorticales que formula la hipótesis, aparezcan potentes masas de rocas eruptivas, da margen a un gran caudal de dudas.

§ 14

La hipótesis plutónica o de los levantamientos

Esta hipótesis, emitida ya a principios del pasado siglo por A. v. Humboldt, L. v. Buch y B. de Beaumont, ha encontrado recientemente en W. Penck y C. G. S. Sandberg nuevos partidarios. Estos investiga-

dores opinan que las masas eruptivas levantan los caparazones sedimentarios que las cubren, originándose así las montañas. Según Penck, las masas eruptivas en cuestión, contenidas dentro de la corteza resistente y que se insinúan a través de ésta, ocasionan un acortamiento de la misma, el cual es otra vez reajustado mediante el plegamiento de las porciones de corteza que descansan sobre las masas eruptivas. Cree que sus ideas están comprobadas por las observaciones que el autor mismo ha llevado a cabo en los Andes argentinos ¹. Sin embargo, advierte H. Gerth ² acerca de esto que la formación de las Cordilleras anteriores y de las Sierras pampeanas no puede ser atribuida a intrusiones en los núcleos de anticlinales levantados aisladamente, pues las intrusiones corresponden a una edad marcadamente más antigua.

Contra la hipótesis hay que tener en cuenta :

a) Hay montañas de plegamiento que no presentan ninguna clase de intrusiones magmáticas, como los Alpes; muchas, como el Jura Suizo, ni siquiera tienen núcleo cristalino.

b) Allí donde sobre las masas eruptivas ascendentes se ha conservado el caparazón sedimentario, éste habría de presentar fenómenos de tracción, fallas, etc. Pero realmente los sedimentos aparecen sumamente plegados sobre el macizo central, como en los Alpes, en el Cáucaso. (E. Kayser, op. cit., p. 963.)

c) La estructura de las masas eruptivas deja reconocer que no se hincharon, sino que, lo mismo que los sedimentos que sobre ellas descansan, están plegadas.

¹ Der Südrand der Puna de Atacama. Ein Beitrag zur Kenntnis des andinen Gebirgstypus und zu der Frage der Gebirgsbildung. *Abh. Sächs. Ak. d. Wiss. Math.-phys. Kl.*, t. 37, Leipzig, 1920.

² Importancia de las investigaciones geológicas de la Cordillera meridional de la Puna de Atacama para la historia de los Andes y de las formaciones montañosas en general. *Geol. Rundsch.*, t. 12, 1921.

En todas las montañas de plegamiento que contienen macizo central aparece de manifiesto el hecho de que las masas eruptivas no han actuado como causantes del levantamiento, sino desempeñando un papel pasivo. Han sido incluidas en el proceso deformativo, especialmente en sus postrimerías, pero sin imprimir a los sedimentos plegados ningún carácter especial. (E. Kayser, op. cit., p. 963.)

d) Las masas eruptivas ascendentes pueden muy bien levantar las cubiertas sedimentarias y romperlas, mas no desplazarlas hacia los lados. La solidez, la presión de tales sedimentos es tan grande, que no admite un arrugamiento de conjunto ocasionado por la acción de empuje o expansiva de los flancos de las masas eruptivas que se hinchan bajo tales cubiertas sedimentarias. Como aquí intervienen las presiones hidrostáticas, los sedimentos debieran ser levantados, desde luego, a unos 20 kilómetros, hasta que en el pie de las ondulaciones del suelo la presión llegase a ser tal (7.000 kg. por centímetro cuadrado) que originase un reblandecimiento o un arrugamiento general (véase § 11). En el granito, todavía a 17 km. de profundidad pueden existir cavidades (es decir, bajo una presión de 5.000 kg. por centímetro cuadrado), a pesar de existir allí una temperatura de 500°¹.

e) La idea sustentada por Penck en el sentido de que las gigantescas intrusiones andesíticas de los Andes constituyen asimismo intrusiones con grandes cavidades vacías en la corteza, ha sido puesta muy en duda por las nuevas investigaciones de H. Cloos².

f) En un estudio sobre los Cárpatos, los Apalaches y algunas otras cadenas montañosas, abunda W. v. Lo-

¹ FR. D. ADAMS, An experimental contribution to the question of the depth of the zone of flow in earth's crust. *Journ. of Geol.*, t. 20, 1912.

² *Das Batholithproblem*. Berlin, 1923.

zinski¹ en lo expuesto en el párrafo *d*), en el sentido de que estas montañas no son tanto debidas a una inverosímil gran caída o descenso como a la fuerza lateral de empuje de los magmas hinchados en sus post-países. La presión lateral, pues, ha de actuar cuando el magma es obligado a empujar hacia arriba por el substratum fuertemente perturbado allí donde las capas limitantes están enmarañadas y frecuentemente interrumpidas. Lozinski deja de considerar, junto con esto, que la presión contraria que impide al magma su ascensión no es, en la mayoría de los casos, otra cosa que el mismo peso de las capas que se fragmentan. Si la fuerza ascensional del magma es mayor que el peso de las masas que sobre él descansan, éstas experimentarán un levantamiento; las fuerzas de cohesión no oponen ninguna gran resistencia al levantamiento de una serie potente de estratos acribilada por cavidades. La energía con que el magma ascendente comprime las paredes no está, pues, determinada por factores infratéluricos de ninguna clase, sino solamente por la diferencia de altura hidrostática, por lo menos a partir del momento en que ha procurado hallar su libre salida a la superficie de la Tierra.

g) Ya hace tiempo que A. Rothpletz expuso ideas² que guardan semejanza con las de W. Penck, y en parte también con las de M. Reade, G. v. de Borne, K. Andree (véase §§ 12 y 13). Según Rothpletz, las porciones de la corteza terrestre se elevan en aquellos puntos donde a causa de la solidificación, las masas plásticas infra-yacentes aumentan de volumen. Las zonas elevadas, los continentes, tiene una curvatura algo más acentuada que las porciones restantes de la corteza terrestre. La compensación resultante origina el plegamiento de montañas periféricas o de reborde. En las juntas de los des-

¹ Vulkanismus und Zusammenschub. *Geol. Rundsch.*, tomo 9, 1918.

² *Geotektonische Probleme*. Stuttgart, 1894.

garramientos pueden ascender al exterior magnas flúidos procedentes de la profundidad.

Pero no tiene Rothpletz en cuenta que las zonas de la corteza más fuertemente plegadas pueden aparecer sólo en los bordes, si allí existe un gran contrafuerte que se oponga a un aplanamiento del acombamiento. Sin embargo, una fuerza acombadora sólo podría aparecer en las regiones levantadas de la corteza si, al mismo tiempo que se producía el levantamiento, con aumento de superficie, tuviese lugar una presión lateral e irreversible; o cuando las soluciones de continuidad de la corteza, sobre las cuales se eleva, dependiesen de la fuerza subsiguiente a una disminución de superficie igualmente irreversible. Tanto para lo uno como para lo otro falta una explicación suficiente. En virtud de la compensación de ondulaciones anisostáticas de la corteza terrestre, sólo pueden, por lo demás, producirse pliegues insignificantes (véase § 29).

h) Sandberg¹ considera que, desde un principio, el magna que se halla debajo de los geosinclinales es activo y, por consiguiente, pudiera originar zonas orogénicas. Cree este autor que cuando los sedimentos han adquirido mucho espesor y, al mismo tiempo, se han hundido isostáticamente hasta una determinada profundidad, el agua interpuesta se transforma en vapor, el cual es capaz de alcanzar una considerable presión, suficiente para levantar las capas sedimentarias a mucha altura sobre el nivel que tenían; y que éstas, entonces, al ser comprimidas hacia las zonas adyacentes, quedan plegadas. Sus conclusiones, empero, no descansan sobre una recta interpretación física. Las consecuencias que saca de los valores que alcanzan las presiones al calentarse el agua, dentro de un volumen preciso, no son objetivas, toda vez que una leve variación de volumen es suficiente

¹ C. G. SANDBERG, *Geodynamische Probleme*, Berlin, 1924.

para que se altere la presión de las rocas; y los resultados referentes a los valores de la tensión del vapor se apoyan sobre un principio erróneo, como fácilmente puede demostrarse. El punto crítico de la presión del vapor de agua es de 20 atmósferas, la temperatura crítica son 364° y la cohesión crítica aproximadamente 0,2. Un hundimiento hasta 50 km. es difícil que pueda tener lugar. En esta profundidad la temperatura llega a unos 1.500° y la presión de las rocas alcanza a 15.000 atmósferas. Según la ley de Boyle y Mariotte, a estos valores numéricos corresponde una cohesión del vapor que difiere de la cohesión del agua sólo en una leve fracción. La acción que desarrolle el agua al transformarse en vapor es, por consiguiente, débil.

d) Las consideraciones de Haarmann (véase § 11. apartado g) sobre la tectogénesis primaria relacionan la «teoría de las oscilaciones» con la hipótesis plutónica. Haarmann atribuye la aparición de los tumores y de las presiones anejas, a los esfuerzos que la Tierra se ve obligada a hacer para recobrar su equilibrio gravitatorio perdido a causa de los desplazamientos de los polos. Bajo el influjo de la gravedad y de la fuerza centrífuga, el magma infracortical, más o menos movedizo, es arrastrado de una manera conjunta y también relativa. De este modo se produce un levantamiento y un hundimiento rítmicos, una oscilación de las porciones corticales.

Si Haarmann atribuye la formación de tumores y depresiones al deambular de la superficie del globo terráqueo, a consecuencia del rodete de masas ecuatoriales que se deforma por efecto de los desplazamientos polares, es lógico pensar que la pesantez no alcance ninguna diferencia de nivel, y que, cuando aquéllos tienen lugar en virtud de resbalamientos, vuelva a equilibrarse de nuevo. Aunque la idea de los desplazamientos polares es aceptable (véase § 8), no tiene aún ninguna consistencia

en cuanto a poder servir de explicación a los tumores y las depresiones. La base física está por establecer de una manera clara, y la elaboración completa de este trabajo no permite esperanzas favorables para dicha teoría.

§ 15

La hipótesis de los ciclos, de J. Joly

La energía calorífica procedente del interior del globo, y que por conducción libera la superficie del mismo, alcanza la cifra de 50 a 60 calorías por cm.^2 anualmente. Esta cantidad de calor procede de la «desintegración» de los materiales radiactivos situados en una capa de rocas de Sial continental, de unos 30 km. de espesor. Puesto que es de creer que todavía a mayores profundidades existan sustancias radiactivas, el calor no irradiado debe ir concentrándose en una determinada profundidad. Como esta liberación de calor alcance un cierto grado, las rocas allí situadas experimentarán la fusión. Puesto que la corteza sólida sobrenada en un substrátum pastoso, la atracción de la Luna, que se opera de Este a Oeste sobre la Tierra, se traduce en un retardo del movimiento rotatorio de la capa cortical. Desplazándose retrasada sobre su substrátum, los continentes y los océanos cambian de lugar en relación con la estructura profunda. Como el Sial tiene un punto de fusión centenares de grados más elevado que el Sima, el substrátum sinático situado bajo los continentes está más caliente que el Sima que se halla debajo de los océanos. Consecuencia de esto es que allí aumenta la pérdida de calor por la superficie. Por efecto del cambio sucesivo de posición, el Sima, antes cubierto por los continentes y sobrecalentado, experimenta una considerable fusión de la cubierta situada debajo de los océanos. En su virtud se produce allí un aumento de liberación de calor hacia la

superficie. La pérdida de calor excede al calor que al mismo tiempo liberan los cuerpos radiactivos que se desintegran. De nuevo tiene lugar un enfriamiento, y con él cierto endurecimiento de las masas, hasta que el Sima infracontinental vuelve a ser sobrecalentado; y así sucesivamente el fenómeno se repite. Puesto que la fusión del Sima tiene como consecuencia un aumento de volumen, la solidificación tiene que ir acompañada de aumento de volumen, por lo que en la primera parte del ciclo tienen que producirse en la corteza fenómenos de tracción, y en la segunda parte han de tener lugar fenómenos de compresión, de plegamiento¹.

En unas consideraciones críticas muy sagaces, llega Fr. Lotze² a la conclusión de que ni la duración de los períodos geológicos puede compaginarse con las bases físicas aducidas por la hipótesis de Joly, ni los mismos fenómenos geológicos tampoco con el dualismo de las fuerzas tectónicas (compresión y tensión). Nosotros nos remitimos a su trabajo y todavía presentamos algunos argumentos de índole más general.

a) La afirmación de que las zonas continentales y oceánicas permutan sus localizaciones como consecuencia de la migración cortical de Este a Oeste sólo tiene valor para el hemisferio austral. En el hemisferio boreal, Asia, con Europa, no resbalan sobre el Atlántico, ni todo el Noroeste de América del Norte sobre el Pacífico. El Océano Atlántico no tiene la anchura necesaria; y la América del Noroeste y el Nordeste asiático se entrocortan al desplazarse.

b) Joly manifiesta que la irradiación terrestre ha de bastar para arrebatar el calor producido en el Sima del fondo de los océanos, en donde, según él, tiene lugar

¹ J. JOLY. *The Surface History of the Earth*; Oxford, 1925.

² FR. LOTZE. Die Joly'sche Radioaktivitätshypothese zur Erklärung der Gebirgsbildungen. *Nachr. der Gesellsch. der Wissensch. zu Göttingen; Math.-phys. Klasse*, 1927.

una condensación cuando el Sima sobrecalentado ha liberado su excedente calorífico. La creación de calor es menor, seguramente, en el Sial que en el Sial. Pero puesto que la desproporción no es muy grande (no alcanza el valor 1 : 13), el postulado en virtud del cual lo que del Sima se pierde es recogido por el Sial, difícilmente es más verosímil que el postulado de Joly. Además, en el caso presente la totalidad de los fenómenos imaginados por Joly carece de base física.

e) No todos los fondos submarinos se componen de Sima. El Océano Atlántico tiene una película de Sial que alcanza de 20 a 30 km. de espesor.

d) La opinión de Joly, en cuya virtud el calor engendrado en el interior de la Tierra se acumula en una cierta profundidad, es inadmisibile. El gradiente térmico de la corteza depende del calor producido. La energía calorífica no es, por tanto, consumida en reblandecer y fundir el Sima de debajo por los continentes hasta una cierta profundidad; únicamente sus efectos se notan en las isotermas. La corteza sólida y coherente es más delgada; pero no se altera de una manera visible en relación con su estado anterior. El gradiente térmico mide el calor engendrado en el interior del globo terráqueo en todo momento de la evolución geológica; calor que no depende de los supuestos cambios en los elementos (véase § 27).

§ 16

La hipótesis de la diferenciación, de C. Mordziol ¹

El magma profundo al ascender exterioriza la tendencia a dividirse en una componente ácida y en otra componente básica. La tendencia a fragmentarse está

¹ *Die Gebirgsbildung der Erde*, Leipzig, 1922.

favorecida por el fenómeno de la liberación selectiva de los gases, el aprisionamiento de unos gases con preferencia a otros; los gases magmáticos se desprenden con mayor facilidad de las porciones básicas, más pesadas, que de las ácidas, más ligeras. Ello se traduce en la aparición de anomalías de gravedad en el conjunto de las masas magmáticas. El material más ligero es desalojado y se ve forzado a desplazarse lateralmente y hacia arriba. Aparecen depresiones constituidas por las porciones de material más pesado, rodeadas de bordes en forma de rodetes asociados unos a otros, aunque sólo de una manera defectuosa. El levantamiento de los rodetes circundantes es sencillamente un efecto de la presión hidrostática de las mismas masas. En las zonas plegadas de la Tierra está de manifiesto este juego tectónico.

a) Según la hipótesis de la diferenciación-isostasia las montañas son masas levantadas isostáticamente. Esta suposición está fuera de toda duda, pero no es suficiente. Pues las cadenas montañosas no son simples combaduras, sino pliegues originados por empujes laterales, los cuales están completamente compensados isostáticamente, aunque no sean de origen isostático.

b) La compensación isostática de las masas en dirección perpendicular es un efecto directo de la pesantez. Una variante en dirección horizontal, que logra una acumulación de las masas más ligeras alrededor de las más pesadas como centro, sólo podría tener lugar como consecuencia de fenómenos catastróficos de carácter disyuntivo.

¿Cómo podrán tener lugar tales fenómenos¹ en masas cuya rigidez es mayor que la del acero?

c) En las zonas de plegamiento los complejos de de-

¹ Fenómenos de esta naturaleza pueden haber acaecido en el período anterior al geológico, cuando la corteza terrestre estaba todavía en formación (véase § 26). Pero Mordziol los admite incluso en el Terciario y hasta en la actualidad.

presiones y elevaciones están dispuestos en bandas alternantes.

¿Cómo explicar esta disposición reglada si los centros de aquellas depresiones de Mordziol, a guisa de cráteres lunares (véase § 30), no manifiestan ninguna distribución que obedezca a ley?

d) Si las cuencas del Tarim y Gobi fuesen núcleos aislados, su notable altitud tendría que ser debida a la acción de la componente básica del magma profundo. ¿Qué fuerzas han actuado, entonces, para que los bordes elevados se levantasen sobre las altiplanicies centrales indicadas?

e) ¿Por qué la diferenciación de magma profundo sólo se efectúa en el substratum de los geosinclinales, y cómo se explica el proceso cíclico de la misma?

§ 17

Hipótesis fundadas en el movimiento de rotación o revolución terrestre

a) *Hipótesis de la segregación de la Luna,* *de W. Pickering y G. H. Darwin*

Dos cuerpos celestes que constituyen un sistema, y cuyas masas son flúidas o gaseosas, originan mutuas mareas. Si las masas obedecen a la fricción interna, estos flujos de marea originan en el cuerpo celeste un retardo de su marcha. La cúspide de la marea no está opuesta al cuerpo que la origina, sino que a causa de la resistencia que las masas de las ondas de marea oponen al levantamiento de la marea, se desplaza esa cúspide con respecto a la línea de unión de los cuerpos celestes, e incluso avanza (en el sentido de la rotación de los cuerpos sometidos a la acción mutua de marea), cuando la rotación es más rápida; pero retrocede si esta rotación

es más lenta que el movimiento de desplazamiento alrededor del común centro de gravedad. Como G. H. Darwin ha indicado¹, las deformaciones de las masas, originadas por las mareas, acarrearán perturbaciones seculares en los elementos orbitarios. Si la marea que la marea levanta precede al cuerpo que la engendra, el eje mayor se alarga, y aumenta también la excentricidad de la órbita; al mismo tiempo disminuyen la velocidad de rotación del cuerpo que experimenta la marea, y el ángulo entre el eje y el plano de la órbita.

La teoría de la fricción de marea tiene aplicación para la Luna. Si la masa de la Tierra estaba al principio sometida a los efectos de la fricción interna, es de presumir que la Luna describió al principio una órbita mucho más reducida alrededor de la Tierra. El desarrollo puede seguirse de una manera retrospectiva hasta el momento en que la Luna acabó por girar en torno a la Tierra tan aceleradamente como ésta efectuase su movimiento de rotación. Esto sucedió cuando el radio de la órbita lunar llegó a ser doble que el actual radio terrestre, y el período de la revolución fué de cuatro horas. Acerca de estadios todavía más lejanos del desarrollo lunar, sólo cabe hacer conjeturas. Darwin juzga que la deformación de marea que origina el Sol en la Tierra seguramente estaría reforzada por la propia oscilación o vibración que en el mismo período, aproximadamente, tendría lugar en la masa terrestre, y que la suma de ambos fenómenos daría lugar a que las masas apicales de la onda de marea lograsen separarse y acabasen por apelotonarse y dar origen a la Luna.

Según Pickering, la masa Tierra-Luna reunidas recorrió rápidamente, mientras se contraía, la figura de equi-

¹ Una porción de trabajos en las *Phil. Trans. of the Roy. Soc. Londres*, 1879 hasta 1882. Véase también *Ebbe und Flut* («Flujo y Reflujo»), así como fenómenos análogos en el Sistema solar, 2.^a edición, Leipzig, 1911.

librio gravitatorio de un fluido en rotación, primero con la forma de un elipsoide de rotación cada vez más aplastado, después la de un elipsoide de Jacobi, de tres ejes, cada vez más alargado, y finalmente la figura piriforme de Poincaré, hasta que por último, a causa de la inestabilidad, ésta se dividió en dos trozos, el menor de los cuales constituyó la Luna. Ambos puntos de vista son susceptibles de una comprobación exacta¹.

a) *La hipótesis de Pickering.*—Ya se había pensado en el hecho de que cuando el período de traslación de la Luna era igual que el período de rotación de la Tierra, éste tenía unas cuatro horas de duración, aproximadamente. Una rotación de cuatro horas no implicaba, empero, que la masa Tierra-Luna fuese inestable. A ella le correspondía como figura de rotación un elipsoide de rotación de Maclaurin, cuyo aplastamiento ($\frac{1}{f_8}$) es sólo algo mayor que el aplastamiento de Saturno ($\frac{1}{f_{16}}$). Tan pronto como el momento de rotación de la masa Tierra-Luna fuese de 2,2 veces mayor, es verosímil que su forma fuese la de la figura límite del elipsoide de Maclaurin (0,583 de aplastamiento); y cuando el momento fuese 2,8 veces mayor, dicha masa ya no sería estable, sino que adoptaría el elipsoide triáxico de Jacobi, y entonces, plegándose a la figura piriforme de rotación de Poincaré, se fragmentaría. Todavía más difíciles serían las circunstancias cuando la cohesión media de la masa Tierra-Luna era menor que la actual.

Que el sistema Tierra-Luna no puede haberse originado en virtud de la fragmentación de un cuerpo giratorio que fué haciéndose inestable lo demuestra también el hecho de que en este caso, y a la vista de cálculos aritméticos, la relación entre las masas de ambas porciones no debería estar por bajo de 1 : 3, mientras que esta relación entre la Luna y la Tierra es 1 : 80.

¹ Fr. NÖLKE, *Der Ursprungsort des Mondes, Gerlands Beiträge zur Geophysik*, t. 41, 1934, p. 86.

b) *La hipótesis de Darwin.*—Que los flujos tidales o de marea producidos por el Sol en la Tierra pudieran alcanzar una considerable altura cuando su período fuese muy próximo en duración al período de la propia oscilación del cuerpo terráqueo, se explica; pero fácil es comprender que las masas piensas de la onda de marea tienen que acabar por venirse abajo, siendo éfmera su duración independiente.

La separación de la masa lunar es posible cuando el alejamiento del centro de la Tierra vale R . Entonces describe una trayectoria elíptica, cuya forma está determinada por el valor del momento de rotación en el instante de la separación y el valor de la distancia R en el apogeo. Siendo M la masa de la Tierra, G la constante de la gravitación, A el semieje mayor de la órbita, y E su excentricidad, y aplicando la ecuación del problema de los dos cuerpos, para la velocidad V de la masa lunar, con el alejamiento R , resulta el valor

$$v = \sqrt{GM \left(\frac{2}{R} - \frac{1}{A} \right)}$$

Como elipsoide de rotación, supongamos que la masa Tierra-Luna, indivisa, tenga el radio ecuatorial r , y una velocidad ecuatorial v . El momento de rotación de una masa situada en el Ecuador m es entonces igual a mrv . Puesto que, según el teorema de las superficies, en Mecánica, la masa m conserva el momento si alcanza en el flujo tidal o de marea la altura R , resulta la igualdad

$$mRv = mrv.$$

Puesto que $R = a(1 + e)$, se deduce que

$$\sqrt{GM} R(1 - e) = vr.$$

Designando por r_0 el radio terrestre actual, si la masa

Tierra-Luna girase en cuatro horas, tendría un radio ecuatorial $r = 1.04r_0$, y su aplastamiento sería $\frac{1}{8}$; y la velocidad es $v = 2.9$ km. por segundo. Dando a G , M , r y v sus valores numéricos, resulta

$$\frac{R}{r_0}(1-e) = \frac{1}{7}$$

Para $R = 3r_0$, por ejemplo, resulta $e = 0.952$, $a = 1.5r_0$. Para $R = 2r_0$, resulta $e = 0.929$, $a = r_0$. En ambos casos la distancia perigéica de la órbita lunar $q = a(1 - e)$ es igual a $\frac{1}{14}r_0$. *La órbita es, pues, muy próximamente elíptica, y puesto que se aproxima al centro de la Tierra hasta $\frac{1}{14}$ del radio terrestre, no arrastra ésta a la Luna en su derredor, sino que inmediatamente después de la amputación, según un plano casi perpendicular, vuelve a quedar sumergida en la masa terrestre.* Ocurrido ello, el juego podría reanudarse, y no tendría fin. Jamás habría posibilidad de formarse una masa lunar permanente.

Jeffreys ha esgrimido un segundo argumento contra la hipótesis de la resonancia¹. La validez de la hipótesis estriba en lo minúsculo de los frotamientos; por tanto, las fricciones no determinan necesariamente un límite máximo para la amplitud que una oscilación puede alcanzar en virtud de la resonancia. El movimiento de rotación de la Tierra, deformada por causa de los elevados penachos de flujo tidal o de marea, no es uniforme. El núcleo del globo terráqueo, que no está sino débilmente influido por el movimiento de tal flujo, gira casi uniformemente. Sobre este movimiento de rotación se superpone, empero, en la capa envolvente de la Tierra, un movimiento acelerado y retardado periódicamente, con componentes radiales, inherente a los penachos de ma-

¹ H. JEFFREYS, The Resonance-Theory of the Moon. *Monthly Nat. Roy. Astr. Soc.*, vol. 91, 1930, p. 169.

rea. La componente tangencial de velocidad es menor en éstos que la velocidad giratoria del núcleo, y es mayor en los valles o depresiones intermedias a los penachos. La fricción interna procura equilibrar esta discrepancia y actúa, por tanto, frenando el movimiento en los penachos. Según Jeffreys, la fricción es tan grande que la energía necesaria para la acumulación o apilamiento de los penachos de marea se gasta 500 veces más rápidamente que pudiera suplirla la fuerza de marea del Sol. *Teniendo esto presente, nunca los penachos de marea pueden alcanzar la altura necesaria*; todo lo más alto a que pueden llegar representa $\frac{1}{23}$ del radio terrestre.

La opinión en virtud de la cual la Cuenca Pacífica es el lugar de origen de la Luna, lo mismo desde los puntos de vista de Pickering que de Darwin, tiene en su contra un hecho, a saber: puesto que las fluctuaciones de marea, con una amplitud creciente a lo largo del radio del globo terráqueo, perturbarían al conjunto de la masa de la Tierra, los fenómenos subsiguientes a la formación de la Luna no sólo habrían originado una cicatriz en el lugar de ruptura o separación, sino que habrían transformado totalmente su superficie.

§ 18

β) La hipótesis del retardo rotatorio, de A. Böhm

Si la duración del período de la rotación terrestre aumenta a causa del frotamiento de marea, el aplastamiento ha de ir siendo menor. A. Böhm¹ opina que la adaptación a la nueva figura de rotación se efectuará de una manera más rápida en las capas exteriores que en las interiores, y que las primeras, a causa de su esfuerzo, se aproximarán a la forma esférica, por lo cual las

¹ *Abplattung und Gebirgsbildung*. Viena y Leipzig, 1910. Crítica de la Hipótesis de Fr. Peckels, *Geol. Rundsch.* 2.º t., 1911.

capas internas experimentarán un arrugamiento en sentido de los paralelos que dará origen a plegamientos montañosos. El plegamiento de las montañas meridianas obedece al acortamiento del circuito ecuatorial.

a) Los nuevos cálculos de los períodos de entrada de las manchas solares de la antigüedad sólo concuerdan con los datos de los antiguos si se tiene en cuenta que el movimiento de la Luna experimenta una aceleración de algunos segundos. La aceleración corresponde a un retardo de la rotación terrestre producido por la fricción de marea, que alcanza igual valor, por lo menos. Asimismo, dondequiera que tenga lugar el frotamiento de marea, sea en cuencas marinas cerradas o en el interior de la Tierra, su valor es extraordinariamente pequeño, y sucede lo mismo también si la acción observable tuviese que quedar reducida a una fractura, por proceder de circunstancias de otra índole, por ejemplo de un aceleramiento de la rotación a causa de la concentración del volumen terrestre (véase § 25). Tampoco en el pasado geológico más próximo la influencia de las mareas parece haber sido mayor que en la actualidad. De ahí se infiere que uno de los principales períodos de plegamiento de la Tierra, el terciario, no puede haber sido producido por una fricción de origen tidal que diese lugar a un retardo en la rotación terrestre.

b) Puesto que la fricción de marea continúa sin interrupción, la orogénesis tendría que efectuarse de una manera permanente. Los períodos orogénicos permanecen, pues, sin explicación.

c) En todos los elipsoides de revolución estables, o sean aquellos cuya relación axial es como 0,583, la circunferencia meridiana no experimenta ninguna disminución a causa del redondeamiento de la esfera, sino un estiramiento. Si el eje ecuatorial disminuye según $1 : \lambda$, la circunferencia meridiana aumenta, aproximadamente, en la relación $\sqrt{\lambda} : 1$. Por ejemplo: si la circunferen-

cia ecuatorial se acorta en 100 km., la circunferencia meridiana aumenta en 50 km. Si a pesar de este incremento existiesen plegamientos montañosos dirigidos en sentido de los paralelos, cualquiera que fuese su origen, aparecería nuevamente un estiramiento meridiano que superaría al conjunto de empujes plegadores originados por fracturas y fosas. De ello nada se sabe, empero.

d) La hipótesis del retardo que Böhm preconiza ha sido ampliada por H. Quiring¹; sin embargo, frente a esta nueva modalidad persisten argumentos expuestos. En primer lugar hay que volver a tener en cuenta que los meridianos experimentan una dilatación cuando el elipsoide de rotación se transforma en una esfera; por tanto, en dirección E.-W. tendrían que aparecer fracturas y fosas alternantes entre sí, así como en la misma dirección nacerían plegamientos montañosos. Quiring supone en el radio ecuatorial un acortamiento de siete kilómetros, y el correspondiente alargamiento del radio polar, por valor de 14 km., lo cual implica siete horas más de duración del día terrestre; pero tales valores son demasiado pequeños para hacer comprensible siquiera la grandiosidad de los fenómenos orogénicos terciarios; sólo el plegamiento alpino supone una arruga de centenares de kilómetros. Es particular la idea de que el aumento del período rotacional no se efectúe de una manera continua, sino que al final de los períodos orogénicos dé paso a una aceleración de la rotación.

La crítica que Quiring hace de las hipótesis subsistentes contiene muchas observaciones notables.

¹ Sobre el problema de la formación de la corteza y las cordilleras. *Geol. Rundsch.*, t. 11, 1920.

§ 19

γ) *El desplazamiento apolarifugo de los continentes,
según A. Wegener y W. Köppen*

Wegener y Köppen¹ fundan una deriva de los continentes hacia el Ecuador, una «huida» del polo, basándose en la idea de que flotando sobre el Sima más pesado los escudos continentales más ligeros—pues su centro de gravedad está elevado con respecto al del Sima desalojado—, les corresponde una fuerza centrífuga mayor que la de las zonas circundantes. Es necesario determinar la cuantía de esta fuerza desplazante².

El centro de gravedad del sima desplazado dista r del centro de la Tierra; el centro de gravedad de los caparazones continentales dista $r + h$. Sea m la masa de éstos, y a su latitud. Resulta entonces que si la velocidad angular de la rotación es ω , la fuerza centrífuga del sima ocupado por los caparazones vale $m r \omega^2 \cos a$, y la de los propios caparazones o escudos está representada por la fórmula $m (r + h) \omega^2 \cos a$. Si se multiplica este valor por $\sin a$, se obtiene por sustracción la compo-

¹ A. WEGENER, *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane* (El origen de los continentes y océanos), 4.^a edición, 1929. Braunschweig.—W. KÖPPEN, Über die Kräfte, welche die Kontinentalverschiebungen und Polwanderungen bewirken. *Geol. Rundsch.*, t. 12, 1921 (Sobre las actividades que influyen en las derivas de los continentes y oscilaciones de los polos). Del mismo: Ursachen und Wirkungen der Kontinentalverschiebungen und Polwanderungen. *Pet. Mitt.*, 1921.

² FR. NÖLKE, Physikalische Bedenken gegen A. Wegeners Hypothese der Entstehung der Kontinente und Ozeane. *Pet. Mitt.*, 1922, junio (Objeciones físicas acerca de la hipótesis de Wegener sobre el origen de los continentes y océanos). P. Epstein da otras deducciones menos sencillas bajo el título: Über die Polflucht der Kontinente (Sobre la huida polar de los continentes). *Die Naturwissenschaften*, t. 9, 1921, p. 409.

nente horizontal K_z de la fuerza centrífuga desplazatoria de los escudos hacia el Ecuador :

$$K_z = mh\omega^2 \cos \alpha \operatorname{sen} \alpha.$$

Todavía más que la fuerza centrífuga incrementada influye en el desplazamiento polar la disminución de la atracción. En una primera aproximación, la atracción de la Tierra sobre los escudos continentales es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de su centro de gravedad al centro de la Tierra. Puesto que de un modo aproximado se puede establecer para $l : (r + h)^2$, entre pequeños valores de h :

$$\frac{1}{r^2} \left(1 - \frac{2h}{r}\right),$$

la atracción terrestre sobre los escudos continentales es alrededor de $\frac{2h}{r}$ veces más pequeña que la atracción sobre las masas de sima desplazadas por ellos ; y, por consiguiente, la componente horizontal de la atracción terrestre sobre los continentes es alrededor de $\frac{2h}{r}$ veces menor que la componente horizontal de la fuerza centrífuga, es decir :

$$K_a = 2mh\omega^2 \cos \alpha \operatorname{sen} \alpha$$

(si se tiene en cuenta que, en el caso de equilibrio gravitativo de una masa fluida en rotación, la atracción ejercida sobre un punto de la superficie es igual y contraria a la componente horizontal de la fuerza centrífuga que actúa sobre él).

En su virtud, el total de la fuerza atractiva de los continentes hacia el Ecuador, $K = K_z + K_a$

$$K = \frac{3}{2} m h \omega^2 \operatorname{sen} 2 \alpha$$

Nosotros consideramos los escudos simplemente mitad de una placa cuadrada de lado a , y de altura H . Luego la presión que el desplazamiento lateral ejerce en sentido perpendicular sobre la unidad de superficie del frente postrero, $D = K : 2 a H$; es decir, si el espesor del escudo continental es igual a δ ,

$$D = \frac{3}{2} a h \delta \omega^2 \operatorname{sen} 2 \alpha$$

Si, con Wegener, se hace $h=2,5$ km., $\delta=2,8$ g cm.³, y además $a = 5.000$ km., $\alpha = 45^\circ$, entonces resulta $D = 2$ atmósferas por centímetro cuadrado. No se acostumbra tener en cuenta que una presión sobre un escudo del tamaño de una parte del mundo (5.000 km. de diámetro; para escudos más pequeños la presión es proporcional al diámetro menor), de sólo dos atmósferas por centímetro cuadrado de la pared o frente postrera, no basta para que las masas de sima que se interponen en la trayectoria de los escudos, oponiéndose a su avance, se hagan plásticas, las fuerce a dejar sitio y a levantar montañas y altiplanicies de muchos miles de metros de altura (véase § 24).

La opinión de Epstein, según la cual «las fuerzas centrífugas de la rotación terrestre pueden y deben originar una huida de los polos en el sentido de Wegener» no es exacta. Pues lo que él manifiesta, relativo a que los escudos continentales sólo se desplazan sobre el Sima (véase § 7), no está fundamentado sobre bases suficientemente sólidas. En realidad, aquéllos deben desplazarse en el sima, por lo cual no sólo han de vencer el frotamiento interno del sima que existe debajo y que acompaña a los escudos, sino también la resistencia frontal mucho mayor de las masas de Sima situadas en la trayectoria de éstos. Esta resistencia es tan grande, que los pequeños esfuerzos desplazatorios no bastan para desarrollar ninguna acción sensible.

Para el desplazamiento de los continentes hacia el W. da Wegener como causa las mareas originadas por la Luna. Ahora bien, no basta, ciertamente, que mientras la Tierra era todavía viscosa se fragmentasen los caparazones solidificados flotantes sobre el magma, se empujasen mutuamente y (puesto que el frotamiento producido por la marea determinaría una disminución de la velocidad rotatoria, que hubo de afectar especialmente a las masas ecuatoriales), dichos caparazones fuesen impulsados hacia el Oeste ¹. Pero parece totalmente resuelto para Wegener que este movimiento perdura en los tiempos geológicos más recientes y en la actualidad. Una remoción de las almadías continentales en el sima originaría fuerzas que, como se ha dicho, no son dignas de tenerse en cuenta.

§ 20

8) *La hipótesis pendular de H. Simroth* ¹

Simroth atribuye papel preponderante a las pendulaciones del eje terrestre ideadas por él para explicar las transgresiones y regresiones de los océanos y al mismo tiempo los desplazamientos de las floras y las faunas originados por aquéllas. Puesto que al mismo tiempo las relaciona con la génesis de las cordilleras, la teoría pendular ha de ocupar un sitio en las hipótesis geotectónicas.

Simroth considera que los polos oscilan pendularmente sobre un meridiano, sobre el «círculo de oscilación», pero que estas oscilaciones están ligadas con empujes hacia

¹ G. H. Darwin se expresa, sin duda con mayor circunspección y profundidad, de una manera análoga: *Ebbe und Flut* (Bajamar y pleamar), 2.^a edición, 1911. Leipzig, p. 296-298.

¹ *Die Pendulationstheorie*, 2.^a edición, 1914, Berlin.

el Este y el Oeste. El origen físico de la pendulación debe estar en las fuerzas magnéticas existentes en el Sol y en la Tierra. Simroth escribe ¹: «El Sol es una gran magneto; la Tierra, otra, chiquita. La magneto grande influye tanto sobre la pequeña, que los ejes acaban por quedar paralelos. De ahí que si la magneto pequeña, a causa de cualquier choque o impulso, adopta una variación en su posición, otra vez tiene que volver a ella.» De la pequeñez de las fuerzas directoras «deriva una lentísima incorporación del eje magnético terrestre y una pendulación también lenta a través de la posición primitiva, a empujones crecientes siempre, como exige la teoría de la pendulación».

La hipótesis de Simroth supone que el Sol, tanto como la Tierra, puede ser considerado como una gran magneto ², por lo cual tiene lugar un desplazamiento del eje terrestre, sin duda. No obstante, el desplazamiento se opera de un modo completamente distinto a como Simroth lo imagina. Se comprende fácilmente que, cualquiera que sea la posición que tengan los ejes magnéticos del interior del Sol y la Tierra, las influencias recíprocas de ambas magnetos, exceptuando las ineliminables mutaciones del eje terrestre, se efectúan de una misma manera, incluso si el eje magnético solar estuviese en posición perpendicular a la eclíptica y el eje magnético de la Tierra coincidiese con el de rotación: por tanto las direcciones axiales supuestas in-

¹ Die physikalische Begründung der Pendulation. *Naturw. Wochenschr.* N. F. Bd. 8, 1907, p. 481.

Crítica de la hipótesis de Th. Arldt (*Beiträge zur Geophysik*, 1909, p. 202 ff.; *Archiv. für Naturgesch.*, 1909, p. 189; *Naturw. Wochenschr.*, 1909, p. 747) y de Fr. Nölke (*Deutsche Geogr. Blätter*, 1909, p. 14 y p. 71; *Naturw. Wochenschr.*, 1909, página 651).

² Esta hipótesis es, ante todo, un simple postulado. Las fuerzas magnéticas del Sol hasta hoy sólo están localizadas en las fáculas.

dican la posición media de las posiciones de los ejes magnéticos que oscilan a causa del movimiento de rotación de la Tierra y de su movimiento en derredor del Sol. Las influencias seculares de las fuerzas magnéticas corresponden, por tanto, a esta posición intermedia y se esfuerzan por aproximar el eje de la Tierra a la posición perpendicular a la órbita. Pero de estas tensiones no resulta una oscilación pendular del eje terrestre, sino un movimiento de precesión de forma esférico circular, con permanencia del ángulo de la eclíptica. Entonces la fuerza es de igual efecto que la acción gravitativa que ejercen la Luna y el Sol sobre el abollamiento ecuatorial del elipsoide terrestre de rotación, cuerpos celestes que, por sus tendencias a acercar el eje terrestre a la posición perpendicular a la órbita, producen el conocido avance de los puntos equinocciales. Si la explicación de Simroth fuese exacta, no sería el eje quien variaría de posición en la Tierra, sino en el espacio.

La explicación de Simroth expuesta en la primera edición de su libro, en virtud de la cual la pendulación sería producida por el estallido de una luna, no es viable en ningún caso, puesto que un trastorno, por una vez, de este género, produce en el eje de un cuerpo sólido en rotación un movimiento de precesión libre de esfuerzos, pero no oscilaciones de carácter pendular y constante en un cuerpo pastoso.

Análogamente a Simroth, K. Schneider atribuye los fenómenos orogénicos a desplazamientos de los polos¹. También allí coincide con Simroth en que las oscilaciones polares tienen su causa en el magnetismo terrestre, influido por las actividades magnéticas del Sol. No hay en sus explicaciones nuevos motivos importantes.

¹ Zur Frage über die Ursachen geotektonischer Bewegungen. *Geol. Rundsch.*, t. 8, 1917.

§ 21

e) *La hipótesis de los desplazamientos corticales,
de Kreichgauer*¹

Una tierra rígida sólo da lugar, como la mecánica demuestra, a oscilaciones polares brevemente periódicas. Si los puntos de la superficie en que termina el eje de simetría más corto se señalan como polos geográficos, los polos de rotación describen alrededor de los geográficos un movimiento de precesión esférico-circular².

En una Tierra viscosa las cosas ocurren de otro modo. Si hay fuerzas (como las de marea solar y lunar) que deformen la figura de la Tierra, indudablemente el eje de rotación conserva entonces su posición en el espacio³; pero las masas aisladas en desplazamiento bajo la influencia de las acciones deformadoras no acostumbran a experimentar un movimiento periódico que de una manera repetida, como ocurre en la Tierra sólida o compacta, produce un desplazamiento de su situación primitiva en torno al eje de rotación, sino que tales masas pueden variar su localización con respecto a los polos de

¹ *El problema del Ecuador en Geología*, Steyl, 1902.

² El movimiento de precesión propiamente dicho no es más que aparente; mediante ξ , la dirección del eje de rotación en el espacio permanece invariable, mientras que la Tierra, como un todo, cambia de posición con respecto al eje de rotación. Los fundamentos de los datos aislados de este párrafo están en las explicaciones precedentes contenidas en el § 8.

³ En el lapso de largos períodos, y como resultado de la atracción, se modifica la configuración ecuatorial de la Tierra, y también la situación del eje terráqueo. Este, cuando está libre de las acciones del frotamiento de marea, describe una envoltura cónica, según un ángulo constante con la eclíptica (véase § 20). Este movimiento de precesión es un movimiento forzado (por otras acciones), pero que se supuso libre más arriba y en § 8, en virtud de fuerzas que tienen su lugar en la propia Tierra.

rotación. Pues si los puntos de las masas aisladas de la Tierra no están mutua y sólidamente trabados, entonces sus alejamientos relativos no caerían bajo la influencia de las fuerzas deformadoras que actúan de maneras diversas.

Una Tierra en la cual sobre un substrátum plástico descansa una corteza rígida, presenta, además, otras circunstancias. Si bien el interior de la Tierra, lo mismo que la corteza, se comportan como cuerpos elásticos bajo fuerzas de larga duración y de intensidad suficiente, hay, empero, una diferencia clara entre ellas, en tanto las fuerzas no rebasan un cierto límite. Si las masas calientes del interior de la Tierra ceden o no ante pequeñas fuerzas deformadoras, no podemos nosotros resolverlo. Pero se comprende que las masas de la corteza sólida no tienen esta cualidad. Las montañas, lo mismo las compuestas de rocas sílicas que las formadas por rocas simáticas, pesan desde millones de años sobre su substratum, y durante este tiempo no han resbalado; tampoco las presiones de varios miles de kilogramos bastan para hacer plásticas estas masas frías, quebradizas. Según Kreichgauer, las presiones deformadoras de la corteza sólo alcanzan algunos kilogramos por centímetro cuadrado¹; por esto mismo no son capaces de empujar las masas continentales unas contra otras. Pero son suficientes posiblemente—si no hay ninguna otra resistencia que vencer, dadas las suposiciones no descabelladas acerca del grado de rigidez de las zonas infracorticales—para desplazar la corteza terrestre totalmente sobre el núcleo (véase § 7).

Puesto que un círculo máximo a 45° del Ecuador expe-

¹ Obbedecen a la desigual acción que la fuerza centrífuga ejerce sobre las porciones corticales continentales y oceánicas que están a diversos niveles, por lo cual son del mismo grandor que las presiones que, según Wegener y Köppen, producen una migración continental de los polos (véase § 18).

rimenta, para un grado de variación de su inclinación, un aumento o una disminución de 1 km., la corteza terrestre, al desplazarse en sentido meridiano, sufre grandes expansiones o compresiones, capaces de alcanzar valores de 1.000 km. cm.² (véase § 8, sec. 3). Presiones y tracciones de este orden no bastan, en general, para plegar o fragmentar la corteza. Si el Ecuador pasase a ser meridiano, no se llegaría a estos casos. En los geosinclinales terciarios se han producido acortamientos de centenares de kilómetros.

§ 22

§) *La hipótesis de los levantamientos y hundimientos, de O. Baschin*¹

Relacionada con la «fuga de los polos», según las concepciones de Wegener y Köppen, está la idea de O. Baschin, en virtud de la cual existen también fuerzas que actúan en la corteza terrestre en sentido horizontal cuando los bloques terrestres se levantan y hunden, puesto que al producirse una elevación o un hundimiento aquéllos entran en otra región, en la cual les afecta una velocidad de rotación mayor o menor que la que antes tenían.

Supongamos un escudo cuadrático que tenga la arista a , y que la velocidad de rotación lineal sea v_0 . Si se levanta a la altura h , es decir, si le corresponde el radio terrestre r , su velocidad, en el caso de suponerse que no hay ninguna resistencia de fricción, aproximadamente es igual a $v_0 r : (r + h)$. La velocidad de rotación correspondiente a la nueva situación es $v_0 (r + h) : r$. Por sustracción de ambas cantidades resulta la velocidad v , con la cual el escudo o bloque queda retrasado en su

¹ Influencia de la rotación terrestre en los movimientos tectónicos de la corteza, *Die Naturwissenschaften*, t. 11, 1933, p. 87.

nueva situación con respecto a las masas infrayacentes. En una primera aproximación es $v = 2h v_0 r$. Debe tenerse en cuenta que la energía cinética total que el escudo tiene a consecuencia de su movimiento horizontal, no se transforma en trabajo de fricción ni de destrucción, sino completamente en trabajo de elevación, el cual deberá emplearse en acumular a lo largo de una arista del escudo, en un espacio de la latitud b , una cordillera de sección triangular de la altura h' . En tal caso, siendo m la masa del escudo continental, m' la de la montaña y g la aceleración producida por la gravedad,

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{3} m' g h'$$

Si d es el espesor del escudo continental, δ su densidad, entonces $m = a^2 d \delta$, y $m' = \frac{1}{2} a b h' \delta$, de donde resulta

$$h' = \frac{2}{3} \frac{v_0 h}{r} \sqrt{\frac{3 a d}{b g}}$$

v_0 es igual al producto de la velocidad de rotación en el Ecuador, 464 m/seg., por el coseno de la latitud geográfica α del escudo continental. El espesor del escudo d se calcula en 100 km. Combinando todos los valores conocidos, resulta

$$h' = \frac{h \cos \alpha}{40} \sqrt{\frac{a}{b}}$$

Por ej.: si $a = 10,000$ km., resultará $h' = 0.8 \cos \alpha$, es decir, que si un escudo continental de doble tamaño que Asia se elevase a una altura $h = 1$ km., las fuerzas desarrolladas horizontalmente a lo largo de una arista del escudo originarían una montaña de 800 m. de altura, cuando más, sobre una base longitudinal de 10

kilómetros de ancho. Una cordillera de 100 km. de ancho sólo alcanzaría 250 m. de elevación. Las montañas plegadas de la Tierra son, por el contrario, incomparablemente mayores y más altas. Colígese de allí que las fuerzas que Baschin invoca para la génesis de las montañas han desempeñado tan sólo un papel secundario.

El cálculo se funda en que durante todo el tiempo que dura el levantamiento del escudo continental las presiones horizontales no experimentan variación. Este aserto se verifica en realidad sólo de una manera aproximada, pues el levantamiento tiene lugar tan rápidamente, que el escudo obedece a la inercia de su masa. Si se levanta éste muy lentamente, su inercia es despreciable ¹, y entonces no se suma a las presiones plegadoras en el transcurso del tiempo, sino que alcanza (por un levantamiento siempre constante) un valor muy pequeño. Las presiones horizontales engendradas por levantamientos y hundimientos seculares no originan ningún trabajo.

§ 23

η) *La hipótesis de la excentricidad, de A. Blytt*

La disminución de la rotación terrestre originada por la fricción tidal o de marea ha sido invocada por A. Böhm y también por A. Blytt para explicar la formación de las montañas ². La relacionan con las variaciones de la excentricidad de la órbita terrestre. Los valores de la ex-

¹ Las circunstancias son muy semejantes a las propias de las mareas, que son completamente diferentes según que el movimiento de rotación del cuerpo que las experimenta tenga lugar tan rápida o tan lentamente que la inercia de las masas afectadas por la onda de marea merezca ser tenida en consideración, o no (teorías dinámica y estática de las mareas).

² Breve bosquejo sobre mi hipótesis para el cálculo de los tiempos geológicos (*Geol. Fören Förh.*, Stockholm, 1890, t. XII).

centricidad oscilan entre límites muy próximos. Puesto que la fricción tidal es tanto mayor cuanto menor es la distancia del cuerpo que origina la marea, la rotación terrestre se retarda más en los períodos de mayor excentricidad que en las épocas de excentricidad menor. Las masas sólidas de la Tierra resuenan menos rápidamente a las modificaciones de la velocidad de rotación que las masas leves y movedizas, como las aguas y los océanos. A consecuencia de rápidas disminuciones de la rotación aparecen transgresiones en los polos, regresiones en el Ecuador. Durante los tiempos de menor excentricidad en la órbita, ocurre lo contrario. Los fenómenos orogénicos están relacionados con las variaciones de nivel.

a) Las oscilaciones de la excentricidad ocurren en períodos de algunas decenas de millares de años. Puesto que el tiempo que dura el desarrollo de la Tierra alcanza centenares de millones de años, los ciclos orogénicos deberían repetirse muy a menudo. En realidad, no son numerosos; su duración abarca períodos más de 100 o de 1.000 veces mayores que los períodos de excentricidad de la órbita.

b) Acerca del plegamiento terciario puede decirse lo mismo que con respecto a la hipótesis de B. Böhm (véase § 18).

c) Toda vez que los valores de la excentricidad máximos y mínimos sólo pueden separarse poco entre sí (son 0,0038 y 0,0778), tampoco hay más que pequeñas variaciones en la acción de fricción tidal. Es digno de observarse que estas leves diferencias de acción pueden relacionarse causalmente con los importantes ciclos alternantes de transgresión y regresión.

d) La acción productora de la marea es directamente proporcional a la masa del cuerpo perturbador o perturbado, e inversamente al cubo de su alejamiento. La acción de la fricción tidal es, empero, proporcional a la masa de la onda de marea, es decir, al cuadrado de su

altura, y, por tanto, también al cuadrado de la fuerza causante de la marea. Esta es, en la Luna, 2,2 veces mayor que en el Sol; la fricción producida por la Luna es, pues, cinco veces mayor que la originada por el Sol. En tiempos anteriores, cuando la Luna estaba en una órbita más estrecha (véase § 17), la acción frenatriz era inversamente proporcional a la sexta potencia del radio mayor de la órbita terrestre; y para un alejamiento mitad del actual su influencia era, por consiguiente, 300 veces mayor que la del Sol. Síguese de ahí que las fricciones procedentes de la marea solar serían casi insignificantes comparadas con las que la Luna originase. La disminución de la velocidad de rotación terrestre estaría casi sólo controlada por la Luna, y si aquella se operase de una manera tan rápida que la masa compacta terrestre no pudiera adaptar su figura con suficiente rapidez a la velocidad rotatoria modificada, el Sol, impotente para originar por sí mismo variaciones importantes, habría intervenido de una manera muy secundaria en las transgresiones y regresiones.

§ 24

La hipótesis de los desplazamientos continentales

Puesto que la hipótesis de los puentes continentales no puede conciliarse, según Wegener¹ con los resultados del equilibrio isostático en la corteza terrestre, es preciso suponer que entre las porciones terrestres existió una relación, en épocas pretéritas, que hizo posibles las migraciones de los animales y las plantas; es preciso imaginar que los fragmentos de la corteza han estado antes en inmediato contacto y que después se han alejado o separado unos de otros. La notable coinci-

¹ *El origen de los Continentes y los Océanos*, 4.ª edición, 1929. Braunschweig.

dencia de las formas costeras de ciertos continentes conduce, de una manera espontánea, a la presunción de que alguna vez hayan constituido un solo gran continente. La costa oriental de Sudamérica encaja bastante bien dentro del ángulo que forma el golfo de Guinea, y en su virtud aparece como aceptable la asociación, en una sola individualidad, de Sudamérica y África. Asimismo, las cordilleras que a igual latitud aparecen en ambos continentes tienen, bajo muchos aspectos, estructura y dirección congruentes. Hasta fines del Paleozoico estaba la India anterior desplazada hacia el Sur, sobre toda la porción occidental del Océano Indico; y al Este de aquélla y de la punta meridional de África estaban el escudo australiano y el antártico. Pero no sólo emigraban los continentes, sino también los polos de la Tierra. En el Pérmico, el polo Sur estuvo en el Sur de África. Puesto que al mismo tiempo el polo Norte se encontraba en el Océano Pacífico, de ahí que las huellas de la glaciación pérmica estén localizadas en los continentes meridionales. En el Mesozoico se despedazó el gran escudo continental único; abrióse la fractura atlántica y quedaron separadas Australia y la Antártis. Norteamérica todavía permaneció soldada con el antiguo continente hasta el Cuaternario. Por entonces el polo Norte se situó 20 a 30° más al Sur que hoy día; la gran glaciación cuaternaria localizóse, por esto mismo, en una extensión superficial más pequeña que la que hoy día parece tener. El movimiento desplazatorio alternativo que sucesivamente han tenido el Antiguo y el Nuevo Continente todavía perdura en los tiempos presentes. Groenlandia se aleja de Escandinavia unos 30 m. por año. Las porciones continentales limpian o espacian el Sima de los fondos oceánicos, dejando en él la huella de su paso; por esto aparecen aquéllas arrugadas en su borde frontal. Pensando así se explica la formación de las cordilleras del borde occidental de América. Ni África ni Eu-

ropa están plegadas en su borde occidental, debido a que el Sima que ambos continentes habían de desalojar al producirse recientemente la fractura atlántica, sólo opuso débil resistencia. El borde oriental de Asia está, al parecer, sólidamente soldado al viejo Sima pacífico. Por esto su zona costera ha permanecido pegada, soldada al Sima, y constituye en la actualidad las guirnaldas insulares de la costa oriental. Además de la actividad energética que desarrollan los continentes, en su deriva hacia el Oeste, todavía existe otra tendencia a aproximarlos hacia el Ecuador. A este esfuerzo migratorio de los polos debe su origen el cinturón de plegamientos mediterráneos.

Los argumentos esgrimibles contra la hipótesis de Wegener son de orden teórico y de naturaleza empírica a la vez. A las razones teóricas no da Wegener ninguna importancia. Él opina que si los resultados de la observación fuesen favorables a su hipótesis, las críticas teóricas podrían quedar ignoradas. Desde este punto de vista de los empíricos puros o exclusivos, la hipótesis debiera ser, empero, fatal. Los hechos empíricos necesitan en la mayoría de los casos algo más que una explicación. Por esto es difícil que jamás puedan plantearse conclusiones indubitables, a la vista de simples datos de observación, que, desde luego, presentan muchas lagunas. Los nuevos materiales de observación pueden hacer vacilar los resultados anteriores. De cuán poco hay que confiar en los materiales simplemente empíricos para construir hipótesis tenemos un ejemplo lleno de enseñanzas en la teoría pendular de Simroth. Cuando una hipótesis se construye sobre premisas apriorísticas teóricas, no se debe desechar una prueba de las mismas ¹.

¹ FR. NÖLKE, Comentarios físicos acerca de la Hipótesis de A. Wegener sobre el origen de los Continentes y Océanos. *Pol. Mitt.*, 1922, abril-mayo, y junio.—El mismo: ¿Resisten los fundamentos teóricos de la deriva de los Continentes una prueba teórica? *Zentralbl. für Min., Geol. u. Pal.*, 1923, Nr. 17, p. 525.

a) La fuerza centrífuga mayor que por la rotación terrestre experimentan los escudos continentales que flotan en el sima, estimada por P. Epstein y Fr. Nölke (véase § 19) como capaz de hacerlos resbalar sobre el substratum plástico en sentido de los meridianos a la velocidad calculada por Wegener, desarrolla sobre este substratum un esfuerzo vencedor de la fricción equivalente a 10^{16} g./cm. s. A esta fuerza desplazatoria atribuye Wegener la deriva de los continentes, y cree que este enunciado responde a todas las premisas físicas. Puesto que tal supuesto sólo se refiere a la posibilidad de rebasar la fricción en la cara inferior, mientras que la hipótesis amplía el concepto suponiendo que los escudos, además, despejan el camino de las rocas símicas que ocupan el fondo oceánico y están situadas ante ellos, Wegener piensa, en primer lugar, que sobre el fondo del mar no se extiende ninguna capa sílica delgada, sino que está formado puramente de Sima; y en segundo lugar, que el sima se comportaría como un cuerpo plástico como la cera, en el sentido de la clásica teoría de la viscosidad, es decir, sensible a las más pequeñas presiones y deformable lateralmente. La razón de la primera premisa no ha podido ser demostrada, debido a las grandes dificultades inherentes a la investigación de los fondos oceánicos y de la naturaleza de sus rocas. Acaso pueda suceder así en el Océano Pacífico, pero no en el Océano Atlántico, cuyo fondo, según se deduce de la manera como se propagan las ondas símicas, está constituido por una capa de rocas sílicas, de 20 a 30 km. de espesor. Para poder fundamentar la segunda hipótesis y explicar los fenómenos relacionados con ella, en el sentido de que el sima no está delante de los bloques continentales en marcha, sino que estos mismos se pliegan por su lado frontal, Wegener invoca toda suerte de propiedades físicas en las masas de Sial y Sima, sometidas a presiones duraderas. El cree necesario tener

en cuenta que el Sial se comporta como la cera, la cual sólo cambia de forma si la presión alcanza un cierto valor, mientras que el Sima sería comparable al lacre, que es más duro que la cera, pero más flexible. Estas analogías no aducen, en sí, ninguna fuerza probatoria; son simples suposiciones, que carecen de fundamento seguro. Que el Sima no actuó como un cuerpo viscoso bajo la acción de pequñísimas presiones lo demuestran las numerosas cúpulas basálticas terciarias, que alcanzan alturas considerables, las cuales todavía no se han fluidificado, no obstante que su peso formidable ha gravitado millones de años sobre la base en que se apoyan; aparte el enorme exceso de gravedad de la mayoría de las islas del Pacífico, para cuya explicación es necesario suponer que las masas de rocas de las islas y sus zócalos submarinos no están compensadas isostáticamente, sino que descansan sobre el fondo oceánico símico a guisa de cargas locales; sin olvidar las abisales, que, a pesar de sus bordes rápidos y recortados, el sima limitante experimenta grandes disminuciones de presión, no están todavía rellenas de Sima fluidificado; y finalmente, también los miles de metros que alcanzan las cordilleras, las cuales sólo han podido originarse suponiendo la existencia de masas resistentes, ante las cuales se comprimieron los escudos continentales, manteniéndose, pues, su presión y soportando una resistencia correlativa¹.

Por otra parte, Wegener olvida que si la energía desplazante hacia el ecuador es totalmente invertida en vencer la fricción en la cara inferior de los escudos continentales, difícilmente queda ninguna fuerza plegante,

¹ Es de notar, además, que el fondo del mar es enfriado por las corrientes polares frías, por lo cual su tenacidad es mayor que la de las masas continentales a la misma profundidad. En el fondo del mar predomina una temperatura de 0°, aproximadamente, mientras que la temperatura de las tablas continentales a la misma profundidad es de 100-200°.

y que en el caso de que los continentes no tuviesen ninguna fricción que vencer sobre su substratum y también la resistencia que vencer en el frente, la débil presión plegatriz, que, según los cálculos anteriores, sólo alcanza algunos kilogramos por centímetro cuadrado en el borde continental frontal, únicamente lograría levantar una columna de agua de algunos metros, mientras que, en realidad, las masas rocosas densas han sido levantadas en varios kilómetros en virtud de los pliegues montañosos.

Según Wegener, sucede que «debiera sospecharse que, si la fuerza desplazante normal de los polos sólo es suficiente para el deslizamiento de los continentes en el sima, pero no para su plegamiento», es menester buscar otras fuerzas para explicarlo, en virtud de las cuales la Tierra, por la migración de los polos, experimente una deformación, por la que su forma de equilibrio se ve forzada a adaptarse al nuevo eje de rotación. Sin embargo, tampoco estas fuerzas, que tiran de las masas hacia las zonas profundas, y que según Wegener deben ser 50 a 100 veces mayores, bajo ninguna circunstancia pueden desarrollar el trabajo conducente al plegamiento de las grandes cordilleras. Lo mismo resulta de las presiones desplazatorias, que, según W. Schweydar¹ actúan en dirección Este-Oeste, y hacen que los escudos continentales, en movimiento precesional, giren alrededor de otro eje distinto del eje de la propia Tierra, y las cuales en ciertas latitudes pueden originar fuerzas más de cien veces mayores que las originarias de la migración polar. Y si las fuerzas determinadas por las presiones son de unos 100 kg. por unidad de superficie, ¿cómo se explica que en el plegamiento de las cordilleras se hayan originado presiones de 1.000 y más kilogra-

¹ Observaciones a la hipótesis de Wegener sobre la deriva de los continentes.—*Zeitschr. d. Ges. f. Erdk. zu Berlin*, 1921, Nr. 3-4.

mos por centímetro cuadrado? (véase § 11). Acaso podrían levantar una montaña de agua de unos 1.000 metros, pero en las rocas sólo producirían una tensión molecular, que a la profundidad de 1.000 metros de una mina difícilmente produciría una expansión.

b) Puesto que Wegener considera el Sima como un fluido en el cual nadan los continentes, la altura de su emersión sobre el océano simático y, por tanto, también su elevación sobre el nivel del mar durante la totalidad del pasado geológico habría sido determinada por el principio isostático. Regiones extensas continentales, como son los geosinclinales, están, empero, durante un determinado tiempo bajo el nivel del mar. Entonces es indudable que los geosinclinales no se hunden porque experimenten una sobrecarga de sedimentos, sino que son regiones de sedimentación porque se hunden. Su hundimiento es, por tanto, anisostático; a esto no hace Wegener ninguna aclaración.

c) La segunda premisa fundamental de Wegener, la migración de los polos, ha sido algo modificada en la nueva edición. Estas migraciones, más que a un desplazamiento del eje de rotación en el cuerpo terráqueo, obedecen, según la opinión de Kreichgauer, al desplazamiento de la corteza sólida sobre el núcleo viscoso. Según Kreichgauer, el desplazamiento producido por fuerzas centrífugas empuja a las masas de la porción cortical a desplazarse en el sentido de los meridianos. También habla Wegener ocasionalmente de corrientes en el substratum plástico. Nuestras anteriores consideraciones ponen de manifiesto que en uno y otro caso (véase § 21 y § 8) la corteza se mantiene en su posición relativamente al eje de rotación fijo en el espacio, pues las actividades actuantes paulatinamente no son suficientes para alterarla o para desplazarla, como tendría que suceder si a una nueva posición del eje hubiera de responder una nueva configuración elipsoidal.

d) Según Wegener, América se ha separado del antiguo continente, y todavía crece esta separación en la actualidad. Ahora bien: la fuerza desplazante de los polos, y los continentes, de E. a W., es proporcional al diámetro de la porción terrestre; por tanto, supone una cantidad muchas veces mayor para la tabla continental del antiguo continente que para la porción terrestre de América. De ahí se deduciría que el antiguo mundo volvería a alcanzar al nuevo, no que su separación aumentase.

e) América está limitada al W. por el fondo profundo y antiguo del Pacífico, en tanto que el antiguo continente lo está por el joven del Océano Atlántico. Por consiguiente, América habría de desplazarse más lentamente que el antiguo continente.

f) ¿Por qué América, que avanza por su litoral occidental, está plegada en éste, y Europa y Africa no?

g) Groenlandia se separa rápidamente del antiguo continente, según las nuevas medidas de longitud. ¿Pero a cuánto alcanza desde su situación anterior, puesto que ya el más largo litoral está chocando con el escudo continental americano, de movimiento mucho más paulatino? Y ¿por qué la costa occidental de Groenlandia no manifiesta reacción en forma de pliegues? Si para Groenlandia, realmente, aunque de ninguna manera está demostrado¹, en virtud de estar previamente determinada su posición geográfica mediante numerosas medidas nuevas, su alejamiento de Europa aumentase, no estaríamos en modo alguno ante un desplazamiento continental en el sentido de Wegener, sino tan sólo ante una dislocación local y transitoria, quizá bajo la influencia de la descarga de los hielos cuaternarios.

h) Para adaptar América al antiguo continente, y

¹ F. BRUNSTER.—El desplazamiento de Groenlandia según las determinaciones astronómicas de la longitud. *Pol. Mill.*, t. 67, 1921.

en particular América del Sur al golfo de Guinea, no hay que hacer, como indica Wegener, una simple rotación alrededor del estrecho de Behring, sino, al mismo tiempo, un considerable estiramiento de la costa de Norteamérica¹. Si América del Sur encaja en el golfo de Guinea, entonces el cabo Hornos cae junto a la isla Bouvet y el istmo de Panamá se sitúa algo al S. del punto donde el meridiano 320 corta al Ecuador. Este lugar está a 12.000 kilómetros del estrecho de Behring, y en cambio el istmo de Panamá no está más que a 9.000 kilómetros. El espacio que media entre el cabo Race, en Terranova, y el istmo de Panamá, es de 4.800 kilómetros, mientras Irlanda, que queda junto al cabo Race después de la rotación de Norteamérica alrededor del estrecho de Behring, resulta hallarse a 6.800 km. del punto en que el Ecuador es cortado por el meridiano 320. Un encajamiento de América del Sur en el golfo de Guinea sólo puede efectuarse en virtud de una rotación de toda la porción de tierra alrededor del estrecho de Behring si al mismo tiempo el borde occidental de América del Norte se estira unos 3.000 km., es decir, más del 30 por 100, y el borde occidental unos 2.000 kilómetros, es decir, más del 40 por 100.

¿Qué valor debe dársele a las consideraciones, que modificación no sufren los desarrollos costeros de América del Sur, estrechamente limitados, y de Africa (extensión total, 4.000 km.), si debe hacerse depender su validez de otros supuestos, por ejemplo: que las costas de Norteamérica deberían ser deformables en una extensión mucho mayor, a modo de goma elástica?

Si Norteamérica, inmediatamente después del desplazamiento hacia el W., alcanzare su configuración ac-

¹ Pudiendo establecerse que en Asia y América existen intercambios ciertos de plantas y animales, según demuestra la investigación paleontológica, no se atrevió Wegener a suponer que ambos continentes se separasen en el estrecho de Behring.

tual, habría tenido que experimentar, además del acortamiento de su desarrollo Norte-Sur, gigantescos plegues montañosos dirigidos de Este a Oeste, y enormes fracturas y fosas a causa de las tracciones laterales. De lo uno ni de lo otro existe prueba alguna.

i) América del Sur habría quedado separada de África en el Eoceno; Norteamérica de Europa, en el Pleistoceno. El plegamiento principal de las cordilleras, cuyo levantamiento se considera como la resistencia encontrada por el escudo americano al derivar hacia el W. y hallarse ante el Sima pacífico, es de edad mucho más anterior: en América del Sur data del Cretácico en la mayor parte, y en Norteamérica, del Terciario lo más tarde¹.

b) En general predomina en Wegener la idea de que los continentes se desplazaban sobre el sima quieto en sentido hacia el Ecuador y hacia el Oeste. Pues sólo de este modo se explica la existencia de islas a retaguardia, según se ha dicho a menudo. Circunstancialmente el sima también habría experimentado desplazamientos, y los escudos continentales síalicos flotantes sobre él se comprimirían mutuamente. Las corrientes en el sima se explican porque ante los zócalos que pasan se aparta y luego, tras ellos, tendría que fluir de nuevo. De ahí que las corrientes simáticas se considerarían en parte como efecto, en otros puntos como causa del movimiento de los escudos continentales. Pero jamás pueden ellas en el mismo lugar ser efecto y causa al mismo tiempo, como se ha dicho del sima atlántico, el cual, según Wegener, una vez fluye para colmar la fractura atlántica en vías de continuo ensanchamiento, y las Canarias y las islas de Cabo Verde han sido desgajadas por él de la costa africana, y luego otra vez él mismo produce la

¹ E. HENNING, Nuevas ideas acerca del origen de las formas terrestres, *Naturw. Wochenschr.*, 1921, núm. 48. H. STILLE, *El arrugamiento de la Tierra*, Berlin, 1922, p. 35 f.

fractura atlántica, porque aquí es comprimido y por ambos lados fluye independientemente. En el último caso: las porciones del antiguo continente se desplazarían hacia el E., y las guirnaldas de islas del Oriente asiático se habrían originado, no por tracciones, sino por presión o empujes.

l) El hecho de que la glaciación pérmica se circunscribe a las regiones del hemisferio austral no conduce claramente al postulado que todos los continentes meridionales estaban reunidos alrededor del polo austral, mientras que el polo norte estaba en el mar, sino que permite todavía otra explicación. (Véase § 39.)

m) Wegener opina que la idea de pasos continentales no es admisible para la explicación de las migraciones de plantas y animales, pues la existencia de puentes continentales es incompatible con los principios de la isostasia. Su argumentación quedaría destruida al considerar que la Isostasia es un fenómeno lento. Pero esto no está de ningún modo probado. Por el contrario, puede considerarse como verosímil que en el transcurso del desarrollo tectónico, particularmente en los tiempos de las grandes orogénesis, las condiciones isostáticas de la corteza terrestre sufrieron enormes alteraciones, y que en la actualidad sólo tiene valores aproximados, pues los plegamientos terciarios restablecedores de la Isostasia sólo llevan tras sí un breve espacio de tiempo geológico (véase § 3 y § 28).

n) Según Wegener, existen fuerzas permanentes, las cuales desplazan las porciones terráqueas, y estas fuerzas no crecen en relación con el tiempo¹. Pero no

¹ La tesis de W. Köppen («Orígenes y acciones de los desplazamientos continentales y migraciones polares», *Pol. Mitt.* 1921, Cuaderno julio-agosto), que las fuerzas propulsoras de la migración polar alcanzarían valores mayores a medida que transcurriese el tiempo, es improcedente. Son completamente ajenas al tiempo, así como, por ejemplo, la fuerza del peso de un objeto descansan-

explica por qué las actividades orogénicas sólo se hicieron patentes en determinados períodos geológicos. Según él, la orogénesis tendría que ser un fenómeno continuo ¹.

o) La demostración empírica que Wegener hace para su hipótesis de una pangea paleozoica ha sido objeto de una cuidadosa crítica por parte de muchos investigadores, especialmente C. Diener, W. Soergel, A. Penck, W. Penck, F. Kossmat y M. Senger ². E. Jawoski ha expuesto los argumentos antes citados de una manera particular. El resultado no es favorable a la hipótesis de Wegener. Si se sigue la estructura geológica de los bordes de la fractura atlántica, de la mano de los trabajos geológicos especiales, queda de manifiesto que «los

do sobre una mesa, el cual queda igual, tanto si el cuerpo descansa un minuto como un siglo sobre la mesa.

También la otra opinión («Sobre las fuerzas que determinan el desplazamiento de los continentes y las migraciones de los polos», *Geol. Rundsch.*, t. 12, 1921), que en un zócalo en movimiento hay que tener en cuenta la cantidad de movimiento para ese choque o empuje relativo, y que ésta es tan grande, que ante ella todos los fenómenos de la orogénesis son pequeñas, no es admisible. La surrección de las montañas representa una cantidad de trabajo, y su equivalente no es la cantidad de movimiento del escudo, sino su energía de movimiento, $\frac{1}{2} Mv^2$. Ahora bien: una sencilla demostración (semejante a la expuesta en el § 22) nos enseña que si, p. e., se señala por v la velocidad con la cual, según Wegener, se desplaza Groenlandia hacia el W. (30 m. al año), la energía empleada en el trabajo de levantamiento de un escudo del tamaño del Asia y de 100 km. de espesor sólo alcanzaría a levantar una torre de piedra de 7 metros de lado por 100 de alto. Por este ejemplo se ve con evidencia cuán improcedentes pueden ser las evaluaciones hechas acerca de fuerzas sólo conocidas cualitativamente.

¹ H. STILLE, *El arrugamiento de la Tierra*, 1922, Berlín, página 35.

² C. DIENER, Las grandes formas de la corteza terrestre. *Mitt. k. k. Geogr. Ges. Wien*, t. 58, 1915.—W. SOERGEL, La fractura atlántica. *Zeitschr. d. Deutsch. Geol. Ges.*, t. 68, 1916.—A. PENCK, *Hipótesis de Wegener acerca de los desplazamientos continentales*.—W. PENCK, *Sobre la hipótesis del desplazamiento*.

puentes tectónicos supuestos por Wegener no existen en ningún caso». También «la hipótesis del mutuo golpe o empuje lemúrico no es compatible con los hechos geológicos y paleontológicos».

Al mismo resultado llega W. Schiller¹. Se funda en el gran número de diferencias estratigráficas y contrastes geotectónicos entre Sudamérica y Sudáfrica, y contradice a A. L. du Toit², que creía poder seguir una identificación de caracteres geológicos de ambas porciones de la Tierra como consecuencia inmediata de la hipótesis de Wegener.

Fundándose en un sinnúmero de hechos geológicos y de acuerdo con razonamientos objetivos, existe, en fin, una serie de notables geólogos, principalmente americanos, que no aceptan la hipótesis de Wegener, como puede verse en el libro: *Waterschoot van der Graacht. Theory of Continental Drift, a Symposium*, Tusla, 1928. Casi todos llegan a un dictamen contrario.

p) B. Gutenberg cree que muchos hechos geológicos pueden interpretarse mejor mediante la teoría de la «fluencia» que con la de Wegener³. Razona así: las masas de los bloques continentales tienen, a igual nivel, que soportar un mayor peso que las capas que se encuentran bajo los Océanos, y además las isotermas de debajo de los continentes van más altas que las suboceánicas (donde la isoterma 0° está casi al nivel del fondo, en tanto que la temperatura de la superficie de los continentes, que

¹ W. SCHILLER, Investigaciones geológicas en las montañas del Sudoeste de la provincia de Buenos Aires. *Anales del Museo de la Plata*, IV, 1. Buenos Aires, 1930.

² A. L. DU TOIT, A geological Comparison of South America with South Africa, *Carnegie Inst. of Washington*, Publ. Nr. 381, Washington, 1927.

³ B. GUTENBERG, Die Veränderungen der Erdkruste durch Fließbewegungen der Kontinentalscholle, *Geol. Beitr. zur Geophysik*, Bd. 16, 1927, p. 239, y Bd. 18, 1927, p. 281.

está 4 ½ km. más elevada, sólo en las zonas polares desciende a aquel valor). En su virtud, los bloques continentales se esfuerzan en desplazarse separadamente, y, en sus bordes, las masas continentales tienden a verse o desplazarse sobre los fondos submarinos. Podría ser suficiente pensar que un cuerpo sólido sólo puede seguir la tendencia a hacerse pastoso bajo la acción de su propio peso si la presión inherente a éste rebasa el límite de su solidez. En columnas de algunos kilómetros de altura esto sería, desde luego, posible si la temperatura al pie de aquéllas se acercase al punto de fusión. Mas en cualesquiera bordes continentales, donde las isotermas de los continentes caen a los fondos submarinos de una manera paulatina, no es posible. Según Adams, en el granito pueden subsistir oquedades a profundidades de 17 km. y a 500°. Pero a 5 km., bajo la presión inherente a la pesantez, y a temperaturas de 0°, las rocas no pueden tener consistencia pastosa. Jamás fluyen las montañas de 5 km., aunque tengan en su favor la duración ilimitada de los tiempos.

§ 25

La hipótesis de la contracción

a) *El hecho de la contracción*

Todas las hipótesis revisadas en los capítulos precedentes (bastaban nuestros razonamientos para deducirlo) se estudiaron haciendo hincapié en su insuficiencia. Además de ellas existe todavía una hipótesis, única, que no hemos comprobado; es la hipótesis de la contracción. Aunque la rehusasen, no les quedaría a los geólogos más remedio que resignarse y confesar que la cuestión referente a las fuerzas que rigen las evoluciones

de la Tierra, es insoluble por ahora. El recelo que suscitare esta declaración estriba en las numerosas objeciones que se han esgrimido contra la hipótesis. Por otra parte, se da la circunstancia de que la hipótesis en cuestión ha tenido constantemente eficaces apoyos desde un principio, y la confianza que inspira es grande. Como hecho fundamental, de comprobación objetiva, la Tierra presenta los caracteres de un cuerpo que se arruga. Por empírico que sea el desarrollo explicativo de la contracción, no deja de tener un sólido contenido interno; pierde, en todo caso, el carácter de una simple hipótesis, y adquiere el prestigio de una teoría.

Arguye B. Meyermann que una causa indudable de que la Tierra se arrugue es la variación secular en el período de rotación terrestre¹. Comparando los datos consignados por los cronistas de la antigüedad y del medioevo acerca del momento de los crepúsculos de Sol y de Luna, con el instante que da el cálculo, deducido de la atracción gravitativa de todos los cuerpos que forman parte del sistema solar, se infiere que la aceleración secular de la Luna y del Sol es mayor que la que resulta del cálculo. La consecuencia más relevante que ello trae consigo es, para Meyermann, haber averiguado las causas físicas posibles de esta aceleración secular. Entre ellas figuraría una aceleración secular de la rotación terrestre, cuya componente valdría 50 segundos. Una tal aceleración rotatoria, como no obedezca a ninguna causa externa, sólo puede atribuirse a un arrugamiento del cuerpo terráqueo. Si la Tierra ha experimentado durante el período histórico un arrugamiento, ningún nuevo fundamento hay que buscar para explicarnos los arrugamientos acaecidos durante los tiempos geológicos.

¹ B. MEYERMANN. Die Schwankungen unseres Zeitmasses. *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften*. Bd. VII, Berlin, 1928, p. 92.

*En su virtud, la hipótesis de la contracción se eleva al plano de un razonamiento físico-matemático*¹.

En virtud de un cálculo sencillo, de la aceleración rotatoria se infiere que si *toda* la Tierra se arruga, el radio de nuestro globo se acorta de 6 a 8 centímetros por siglo. Si se arrugase sólo una *capa superficial*, su rotación se aceleraría, y entonces, a causa de la adherencia con los estratos profundos, las masas del interior de la Tierra serían compelidas a girar más de prisa; en tal caso, puesto que una pequeña porción de la masa terrestre ha influido sobre la aceleración rotatoria total, la intensidad del arrugamiento tiene que ser mayor. Si, por ejemplo, sólo se arruga la capa cortical de 100 kilómetros de espesor, calcula Meyermann en 83-135 centímetros por siglo el acortamiento del radio. En opinión de Jeffreys², sólo se arruga un estrato superficial de 100 km., aproximadamente, con la consiguiente pérdida de calor por irradiación. Según él, el enfriamiento alcanza hasta 700 km. de profundidad; sin embargo, un enfriamiento acentuado sólo afecta a los 200-300 kilómetros exteriores. Si el arrugamiento de esta capa acelera la velocidad de rotación secular calculada para toda la masa del globo terráqueo, el radio tiene que acortarse en 30 a 50 cms. por siglo. Sin embargo, según Jeffreys, con la cantidad de calor irradiado sólo cabe un arrugamiento de 1 a 1 ½ mm., es decir, la 300 avas parte de los valores antes consignados. De ahí se deduce que la hipótesis de la contracción no es posible edificarla sobre hechos de observación astronómica, como quiere Jeffreys. No cabe sino pensar que *toda la Tierra se arruga*. En los capítulos que siguen razonaremos las posibilidades físicas de las cuales resulta un arrugamiento del interior del globo terráqueo.

¹ FR. NÖLKE, Numerische Überprüfung der Kontraktionshypothese, *Gerl. Beitr. zur Geophys.*, t. 35, 132, p. 374.

² H. JEFFREYS, *The Earth*, 2 Ed., Cambridge, 1929.

Con arreglo a los cálculos de Meyermann, si se supone que el coeficiente de arrugamiento ha permanecido invariable, el radio terrestre se habría acortado desde los tiempos precámbricos en 900 a 1.000 km.; es decir, en un 15 por 100, aproximadamente. Éste valor acaso sea algo excesivo. Tal vez baste la mitad para explicarnos los plegamientos acaecidos durante los períodos orogénicos.

§ 26

β) La evolución pregeológica

En su afán por escribir la historia de la Tierra, casi todos los autores se han circunscrito a su capítulo geológico, además de pensar únicamente en la corteza y no en el conjunto. Lo equivocado de este proceder no es para asombrarse. De ahí que los problemas parciales sólo puedan ilustrarnos cuando se consideran encuadrados dentro de los problemas de carácter general.

La Tierra no es el único cuerpo celeste de su clase cuyo desarrollo puramente individual hubiera que descubrir; más bien constituye, con la Luna, un sistema cósmico fuertemente trabado, y también, más ampliamente, con una serie de otros planetas y el mismo Sol. Su evolución es, por esto mismo, sólo una parte del desarrollo de sistemas superiores jerárquicos, cuya investigación pertenece a la Astronomía. Cuando se trata de escribir una historia de la Tierra es ineludible situarnos en el campo de las dimensiones cósmicas si no queremos perdernos en la desorientación. Cierto es también que el astrónomo y el astrofísico no pueden todavía seguir, con el único auxilio de la observación, las fases del desarrollo de ningún cuerpo celeste; pero los medios teóricos con que estas ciencias cuentan permiten situar el problema sobre una base física exacta, así como

salvar las soluciones de continuidad que surgen ante la observación. Como, por otra parte, no disponemos aquí del espacio necesario para desarrollar, siquiera brevemente, una exposición de los procedimientos empíricos y de los argumentos teóricos de dichas ciencias, nos ceñiremos al dato que de cerca atañe a nuestro tema: *una nebulosa cósmica de naturaleza gaseosa, que adquirió forma y estructura, se fragmentó en porciones, y estas porciones se constituyeron en el Sol y los planetas*. A este resultado se llega a la postre de un análisis crítico-sistemático de las posibilidades evolutivas que hayan podido acacer a un sistema celeste como es el nuestro solar ¹.

La prehistoria geológica de la Tierra alcanza hasta la aparición de la corteza sólida. Podemos dividirla en varios capítulos.

a) *La Tierra como masa nebular y como nube pulverulenta cósmica*.—La temperatura del espacio, que sólo cruzan las radiaciones estelares, es un poco superior al 0° absoluto. Según Eddington, también la temperatura de las nebulosas cósmicas difusas, extraordinariamente extensas, que debemos considerar como el estado naciente de las estrellas, sólo es de pocos grados por encima del 0° absoluto, si la cohesión de la nebulosa no es menor de 10^{-22} g/cm.³ Las velocidades moleculares de los gases, a estas temperaturas extremadamente bajas, siempre son, todavía, del orden 10^4 cm./sec. Una masa nebular igual a la de la Tierra, de la coherencia antes mencionada, no podría concentrar, atrayéndolas, las partículas gaseosas dotadas de aquellas velocidades moleculares; por lo tanto, les sería imposible reunirse en un espacio más reducido, y no podrían «apelotonarse», sino que se disiparían en los espacios celestes. A temperaturas muy bajas, próximas al punto de condensación, los átomos

¹ FR. NÖLKE, *Der Entwicklungsgang unseres Planetensystems*, Berlin und Bonn, 1930.

de todos los elementos tienen la tendencia a reunirse en *agregados* de átomos y de moléculas. A consecuencia de su masa más grande, estos agregados ya no están animados de las grandes velocidades moleculares de los átomos gaseosos, sino que se desplazan con velocidades considerablemente menores, a las cuales corresponde, según la ley de Maxwell, una equivalente disipación de la energía; y son además inversamente proporcionales a la raíz de la masa. Los agregados moleculares próximos entre sí, que pueden designarse como *partículas pulverulentas* meteóricas cuando llegan a tener un cierto tamaño, alcanzan, por tanto, una estabilidad o quietud relativa, que es tanto mayor cuanto más cerca se hallan.

La atracción que se produce entre los agregados moleculares los obliga a describir trayectorias en derredor del centro gravitatorio común. La materia nebulósica residual de naturaleza gaseiforme que rellena los espacios intermedios, actúa como medio resistente al movimiento, y contribuye al espesamiento de la nube pulverulenta; y, finalmente, inicia un apelsonamiento en el centro de gravedad, en virtud del cual acaban por coincidir mutuamente las diversas trayectorias relativas y las velocidades de las partículas, produciéndose un movimiento giratorio. De esta suerte se fragua el primer núcleo o embrión de un planeta en rotación.

Por consiguiente, el estadio evolutivo de la Tierra subsiguiente a la fase nebulósica faé una nube de polvo meteórico atravesada por masas gaseiformes, y cada vez más coherente, con un núcleo meteorítico fofó.

b) *La Tierra, como planeta.*—Con una cohesión y una masa cada vez mayores, la nube meteórica aumenta su capacidad de atracción. Poco a poco se hace tan considerable, que obliga a adherírsele también las más ínfimas partículas gaseosas errantes. El planeta en cierce rodéase de una envoltura gaseosa y acrece su

masa apropiándose incesantemente las partículas y la materia nebulósica cercanas.

El núcleo central meteorítico está casi frío (frío absoluto). Limitándole, sólo una envoltura gaseosa, a guisa de atmósfera, tiene estabilidad si se compone de gases permanentes. Supuesto que el hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno son una parte esencial de la nebulosa cósmica, esta exposición de hechos imaginados es viable.

La entrada violenta de nuevas partículas meteóricas en la masa del planeta está acompañada de desarrollo de calor, según las leyes termodinámicas. Sin embargo, el calor queda, por lo pronto, limitado a las capas atmosféricas, en cuyo seno las partículas que llegan al fondo pierden su energía de caída. Siendo ellas pequeñas como el polvo, la capa que se calienta es delgada y pobre en masa. Como el crecimiento de la masa planetaria se realiza por espacio de largo tiempo, la mayor parte del calor producido vuelve a irradiarse a los espacios. El polvillo que, despojado de su energía de caída, se hunde en las capas profundas, densas, de la atmósfera, acrece la masa del núcleo planetario y le comunica también algún calor: poco.

En el tercer estadio del desarrollo evolutivo, la Tierra se compone de un núcleo frío, formado por un conglomerado de polvo meteórico, el cual incluye también cantidades considerables de gases fuertemente comprimidos; y una atmósfera envolvente, muy dilatada, que sólo estaba algo caldeada en las proximidades del núcleo, allí precisamente compuesta de gases fácilmente difusibles, especialmente oxígeno¹, y en las capas exteriores constituida por los vapores de elementos de fá-

¹ Que el oxígeno era la mayor parte de la atmósfera de la Tierra en formación se deduce del hecho de que sólo él constituye, aproximadamente, la mitad de la masa de la corteza terrestre.

cil condensabilidad y por sus combinaciones, a temperaturas muy elevadas.

c) *Los albores de la historia térmica de la Tierra.*— Una vez que el planeta ha atraído toda la materia que pudo captar en los contornos, su crecimiento llega a un límite, y las capas más externas fuertemente caldeadas de la atmósfera experimentan un enfriamiento rápido a causa de la irradiación; se inicia la condensación. Se forman nubes de aquellos elementos o de sus combinaciones, los cuales, bajo una determinada temperatura, no pueden permanecer sino en estado gaseoso. Las partículas flúidas o sólidas descendentes forman otra categoría de materia, que vuelve a condensarse y a liquidarse otra vez. De este modo aparecen en la atmósfera planetaria nubes de productos de condensación, cada vez más densas y coherentes.

Quando los productos descienden hasta capas cuya temperatura está por bajo del punto de condensación, ya no vuelven a disolverse. El resultado es formarse alrededor del núcleo planetario, poco a poco, una coraza que es flúida al principio, sólida finalmente. Tan pronto como esto ocurre, la atmósfera que envuelve a la coraza pierde por irradiación su energía calorífica con rapidez. Los fenómenos de condensación atmosférica presentan ahora un carácter catastrófico. Casi todas las partículas susceptibles de condensarse se individualizan y segregan rápidamente, y sólo queda un resto, pobre en masa, constituido también por los gases que a bajas temperaturas conservan su estado propio.

Para los desarrollos doctrinales que siguen, tiene interés escudriñar las circunstancias térmicas de la corteza terrestre. Las temperaturas de condensación de los elementos químicos y sus combinaciones son del orden de algunos miles de grados. Al hundirse los productos de condensación a través de las densas capas atmosféricas inferiores tiene lugar un marcado enfriamiento. Por

ello se producen aún fenómenos de oxidación en una atmósfera de oxígeno, a causa de los cuales éste es consumido poco a poco. Si bien dan lugar al desarrollo de calor de combinación, no son suficientes para elevar sensiblemente la temperatura. De ahí que la temperatura de las masas de la envoltura en vías de solidificación no sea excesivamente elevada, si bien a cierta profundidad comienza a tener un grado suficiente para dar lugar a corrientes de convección capaces de desplazar las masas profundas hacia la superficie, y viceversa, con el resultado final de un enfriamiento.

Todo conspira a la formación de un cuerpo planetario cuya masa nuclear sólo encierra una moderada provisión de energía térmica, en cuya corteza es cierto que la temperatura se eleva, pero no alcanza intensidades tales que pudiesen atentar a la estructura de las masas condensadas; rodea a esta corteza una atmósfera de gases poco estables, que se zafaron de las combinaciones químicas. Tanto el núcleo como la corteza todavía son aptos para nuevas reacciones térmicas.

d) *La formación de la Luna.*—Por cuanto se ha expuesto, el planeta carecía de movimiento giratorio. Algo distinto es el desarrollo evolutivo cuando en él va implícita una gran fase de rotación. En la génesis de este movimiento entran por mucho la estratificación de las masas del planeta y el valor del momento mecánico inherente a aquél. Si el momento se mantiene por debajo de un límite determinado, el planeta es compelido a girar como un cuerpo único y solidario, es decir, todas sus masas componentes con igual velocidad angular. Si la rotación uniforme alcanza, empero, un límite, la fuerza centrífuga en las capas atmosféricas situadas sobre el Ecuador contrarresta inmediatamente a la gravedad. Designamos la superficie de nivel, que en este caso constituye la superficie libre de la atmósfera, como la superficie de nivel *crítica*. Si la atmósfera re-

basa esta superficie crítica, la rotación deviene *heterotáctica*, no uniforme. Inmediatamente las masas atmosféricas superiores correspondientes al Ecuador marchan desligadas y describen trayectorias independientes y fijas. Como las masas próximas al Ecuador, situadas al otro lado de la superficie crítica de nivel, ahora se desplazan hacia aquél, las masas que siguen trayectorias libres entran en contacto con la atmósfera otra vez. Extendiéndose ampliamente la atmósfera, resulta que sólo gira uniformemente la porción situada bajo la superficie crítica de nivel; sin embargo, del otro lado de ésta la velocidad angular decrece, y, sin duda, con arreglo a la tercera ley de Kepler, en el plano del Ecuador esta velocidad es proporcional a la potencia $3/2$ de la distancia al centro del planeta. Como consecuencia de esto, queda delimitada en el plano ecuatorial una zona, en la cual las masas de la atmósfera describen *trayectorias libres*. Los fenómenos mecánicos y térmicos en esta zona dan a la evolución ulterior del planeta un sello muy particular. Las condensaciones que allí se producen no se hunden en las capas profundas, sino que conservan su existencia individual, pues tanto ellas como las masas gaseosas circundantes discurren por trayectorias libres. Mediante procesos de cristalización de nuevas partículas susceptibles de condensarse, crecen en masas siempre más voluminosas y también, si las fuerzas de atracción convergen en ellas, forman conglomerados mayores. De esta suerte, la zona mencionada del plano ecuatorial acaba por ser *matriz de la Luna*. Nuestro satélite se habría formado de la manera que acabamos de describir ¹.

Los corpúsculos condensados en otros territorios atmosféricos, cuya velocidad de rotación es menor que

¹ Para estudiar más de cerca la evolución o embriología de la Luna véase *Entwicklungsgang unseres Planetensystems*, página 204.

la calculada en una trayectoria circular libre, se hundien en las capas atmosféricas profundas y vuelven a disolverse en parte. La circulación atmosférica puede lanzar otra vez sus residuos gaseosos hacia las altas regiones, y condensarse allí nuevamente. La evolución de las masas atmosféricas que no se transforman en luna no se parece, por tanto, a la evolución descrita de la atmósfera de un planeta carente de movimiento de rotación, o que tan sólo gira con lentitud. Todas aquellas partículas que a causa de la poca temperatura no subsisten ya en estado gaseoso, van segregándose poco a poco de la atmósfera y se reúnen en una capa o coraza que adquiere gran espesor alrededor de las capas planetarias profundas.

e) *Formación de los continentes y océanos.*—El momento en que hacen aparición los escudos continentales, destacando sobre las cuencas oceánicas, asunto es que no está aclarado del todo aún. Por de pronto, échase de ver la fuerza de atracción que la Luna ejercería sobre la Tierra cuando no se hallaba todavía muy alejada de ésta. Hay que pensar que, si bien en aquel entonces la Tierra estaba ya rodeada de corteza, la infraestructura no tenía, empero, gran movilidad. En las zonas afectadas por las enormes mareas lunares, la corteza tenía que cuartearse; en su virtud, se hundiría a modo de témpanos, los cuales volverían a fundirse en el seno de las masas sobrecalentadas del substrátum. Después de esta fusión, la temperatura del magma resultante fué todavía lo suficientemente elevada para que el proceso, que ya en la formación de la primitiva corteza dió lugar a la diferenciación de las rocas de Sial y Sima, se repitiese en parte. Formóse una nueva capa de Sial, pero de débil espesor, pues el proceso se realizó bajo condiciones menos favorables que la primera vez. La masa residual de la antigua capa de Sial, que no fué afectada por la diferenciación, adquirió un gran espesor y pasó

a formar parte de las rocas profundas. A consecuencia de la disminución de volumen se formaron cuencas oceánicas, las cuales albergan al Atlántico y al Indico. La viscosidad fué en aumento y, por tanto, aquellos procesos de fusión localizados en las heridas abiertas por las mareas lunares no dieron lugar a nuevas diferenciaciones; y la cicatriz de la coraza sílica dió lugar a la cuenca del Océano Pacífico, que es la más reciente.

§ 27

γ) El «metabolismo» en el interior de la Tierra

Para el desarrollo de la Tierra durante los tiempos geológicos, es oportuno analizar las circunstancias que se dieron en el globo terráqueo al comenzar éstos. La Tierra tiene, en tal instante, un núcleo frío, constituido por polvo meteórico acumulado por las atracciones recíprocas. Lo envuelve una gruesa capa, que al principio es coherente, después experimenta los efectos de elevadas temperaturas y, finalmente, adquiere estado incandescente; esta capa está formada por masas de origen meteórico, las cuales se precipitaron sobre el planeta en formación, desarrollando así su energía calorífica; finalmente, quedó cubierta por la corteza delgada, sólida. Sobre la corteza se extiende una atmósfera gaseosa, la cual todavía no es calentada por el Sol.

La corteza irradia constantemente el calor interno que por conductibilidad le llega; su ulterior evolución está, empero, regida en un leve grado por la intensidad del calor que se pierde al espacio. Mucho más interés para la historia geológica tienen los fenómenos que se producen en lo profundo del cuerpo terráqueo.

Actúan dos grupos de fuerzas, una con carácter termodinámico; químico las otras. El calor de la capa intermedia al núcleo y la corteza es, en parte, transmitido al núcleo. Las partículas radiactivas producen un

calentamiento de *todas* las masas. El calentamiento provoca reacciones químicas. Reacciones que de nuevo traen consigo fenómenos térmicos y además (en general) fenómenos de contracción. La contracción del globo terráqueo libera calor de gravitación, el cual fomenta la terminación de los procesos químicos. El desarrollo total tiende a un estado de equilibrio térmico y químico. Cuando se conoce la constitución material de la Tierra aparecen en seguida algunas particularidades.

a) *Origen de la estratificación de masas por orden de densidades.*—En los meteoritos que caen sobre la Tierra se encuentran frecuentemente inclusiones pétreas, condros. No cabe apenas duda de que se trata de materia nebulósica interestelar cristalizada, por lo cual parece evidente que los condros se formaron antes que el hierro envolvente. De esto puede deducirse que en la nebulosa primitiva de nuestro sistema solar, cuya estructura era pulverulenta, la parte rocosa se formó, si no antes, por lo menos simultáneamente con el polvillo ferruginoso. Por consiguiente, una porción importante de la masa del núcleo terrestre, lo mismo que la capa inmediata, que ya liberaba calor, está constituida por material rocoso. Del modo como se constituyó esféricamente la masa planetaria puede inferirse, además, que también las masas que flotaban de la atmósfera ardiente contentaban, en abigarrado revoltijo, todos los elementos. *Caracterizase, pues, la materia del interior de la Tierra por la estructura en mosaico y la diversidad de composición química.* Tan pronto como la elevación de la temperatura acarrecó desplazamientos moleculares y fenómenos de convección, esa contextura abigarrada hizose imposible. Lentamente tuvo lugar una *estratificación por densidades*. Las masas más densas se hunden hacia el centro, las más ligeras se les superponen. Al mismo tiempo, tienen lugar ingentes transformaciones químicas: derrúmbanse combinaciones pretéritas; otras nuevas se forjan.

Las transformaciones siguen las leyes termo-químicas. En general, a mayor densidad, los minerales y las combinaciones entre éstos exigen mayores presiones. Goldschmidt ¹ ha investigado, con referencia a la materia del interior de la Tierra, algunas posibles reacciones. Relaciona su discusión con la idea de que la masa terrestre era, al principio, un sistema químico homogéneo en estado incandescente, monofásico, el cual después, bajo el influjo del campo gravitatorio de la Tierra, se transformó por enfriamiento en un sistema polifásico. Según nuestras deducciones anteriores, la temperatura de toda la masa central terrestre, en parte sólida, parcialmente gaseosa, era *baja* al principio; después adquirió energía calorífica, y las reacciones químicas, lo mismo que la distribución en el campo gravitatorio terrestre, tuvieron lugar cuando la temperatura alcanzó un determinado grado. Que la temperatura propicia a tales reacciones fuese alcanzada de una manera ascendente o descendente, no tiene la menor importancia, pues la marcha en uno o en otro sentido fué tan paulatina que las variaciones de temperatura producidas en el momento de la reacción no perturbaron el fenómeno sensiblemente. En el interior del globo terráqueo la diferenciación y la consiguiente superposición de las masas se efectuaron de manera análoga a como acontece en el alto horno. Si un sistema polifásico se transforma en un sistema monofásico, sucederá que, no obstante poder producirse un aumento considerable de temperatura, el sistema polifásico no volverá a ser monofásico, toda vez que la diferenciación en capas de densidades distintas sería ya más refractaria a una nueva entremezcla. El metabolismo de la materia terrestre es irreversible.

b) *Temperatura del interior del globo.*—Los fenómenos químicos que acaecen en el interior de la Tierra,

¹ V. M. GOLDSCHMIDT, Der Stoffwechsel der Erde. *Videnskapsokapellets Skrifter*, 1. math-nat. Klasse, 1922, Nr. 11.

y que tienden a producir la diferenciación de las masas y el arrugamiento, se simultanean generalmente con un aumento de calor. Pero también el solo hecho físico de la contracción terrestre acarrea incremento térmico. Este calor equivale al trabajo mecánico que corresponde a la pérdida de energía que da lugar la contracción. Un acortamiento del radio terrestre equivalente al 1 por 100 de su longitud da lugar, por cada gramo de masa terrestre, a un aumento de calor gravitatorio de más de 90 calorías-gramo. Finalmente, las sustancias radiactivas de la materia terrestre producen un acrecentamiento en su energía calorífica. Según cálculos de Holmes¹, cada año se producen en la Tierra, por lo menos, $142,5 \times 10^{17}$ calorías por efecto de los fenómenos radiactivos. En el transcurso de la era geológica ($1,5 \times 10^9$ años), ello supone una cantidad de calor de $2,10^{28}$ calorías, es decir, 3 calorías por cada gramo de masa terrestre. Probablemente esta cifra se queda muy corta. De aquí se deduce que la evolución de la materia terrestre en el transcurso de los tiempos geológicos ha equivalido a centenares de calorías por cada gramo de masa. Este resultado no debe sorprendernos. Una parte grande del calor desarrollado fué ya necesaria para provocar las reacciones químicas, sobre todo en el interior de la Tierra. Cada gramo del núcleo planetario frío debió acumular centenares de calorías hasta que la materia se hallase en condiciones propicias para reaccionar. Y si en el campo gravitatorio de la Tierra se operase un intercambio material en virtud de corrientes radiales, la viscosidad experimentaría una pequeña disminución (sólo posible gracias a las grandes presiones que actúan sobre las masas del interior de la Tierra) únicamente si la estructura molecular de éstas perdiese coherencia a causa del aumento de temperatu-

¹ A. HOLMES, Radioaktivität und die thermische Geschichte der Erde, *Die Naturwissenschaften*, 19 Jahrgang, 1931, p. 76

ra. El núcleo terrestre no transmite las vibraciones transversales, y, por consiguiente, carece de estructura elástica sensible a las acciones periódicas; su rigidez es tan leve todavía, que (según Gutenberg y Jeffreys) puede considerársele como «pastoso». No obstante, el estado pastoso puede coexistir con fuertes presiones si la temperatura alcanza algunos miles de grados, lo cual equivale a una energía calorífica por gramo del orden de 1.000 calorías. Esta energía puede proceder, en parte, de la masa del propio núcleo terrestre, como calor radiactivo o de combinación, y en parte puede también originarse en las capas envolventes, y ser transmitida. Además, no debemos olvidar que la capacidad calorífica de casi todas las sustancias aumenta proporcionalmente con la presión y con la temperatura¹, y de ahí que las elevaciones de temperatura sean sensiblemente más pequeñas que las que produzcan por sí mismos los calores específicos a presiones y temperaturas normales.

La hipótesis de una elevación de la temperatura del interior de la Tierra ha sido negada de una manera rotunda por muchos investigadores: Holmes la califica de «totalmente inaceptable». Sin embargo, creemos haber indicado que tal hipótesis no es de ningún modo rechazable en sí misma ni *a priori*, sino que más bien es completamente inútil para la comprensión del desarrollo de la Tierra. Ya el calor remanente, engendrado por los fenómenos radiactivos, plantea un problema a los geofísicos, dejándoles perplejos. Los estudios de Joly intentan salvar esta dificultad (véase § 15), sin resultado satisfactorio. Según lo que llevamos dicho, el interior de la Tierra es un depósito calorífico de gran capacidad.

¹ A temperaturas y presiones ordinarias el calor específico del hierro y de las rocas oscila entre los valores $\frac{1}{10}$ y $\frac{1}{2}$. Por cada grado de aumento, crecen de 0.001 a 0.002, por lo cual, ya a algunos centenares de grados de elevación, se alcanza un valor muy superior al normal.

Al comienzo de la evolución del globo terráqueo, todo el núcleo terrestre se halla casi en el frío absoluto de los espacios celestes. Por otra parte, las capas corticales profundas son capaces de absorber grandes cantidades de calor, al par que su masa acrece a la del planeta cuando éste se halla todavía en formación. Si no existiese ningún calor a disposición del núcleo y manto, sus masas no estarían en condiciones propicias para ser sede de reacciones químicas. El calor transmitido y acumulado en ellos hizo posible el «intercambio de materia» que impulsó e inició la evolución terrestre.

e) *Variaciones de volumen en el interior del globo terráqueo.*—Según las leyes de la Termodinámica, las reacciones químicas acaecidas en el interior de la Tierra dieron lugar a algunas combinaciones acompañadas de pequeños trastornos espaciales. Frecuentemente los silicatos sometidos a fuertes presiones se transforman en eclogita y rocas afines, con una reducción de volumen de hasta un 20 por 100 con respecto al volumen que tienen las especies químicamente idénticas, pero en el estado cristalino permitido por presiones más débiles. Además, las grandes masas de nubes gaseosas fuertemente comprimidas que llenan los huecos o espacios entre las partículas pulverulentas que integran el núcleo quedan ocluidas por masas sólidas o se transforman en compuestos químicos compactos. Finalmente, el aumento de la presión hasta un 6 por 100 en las masas ecuatoriales, consecuencia del aumento de la fuerza centrífuga inherente al progresivo alejamiento de la Luna, implica fenómenos de arrugamiento.

La contracción, en cambio, acentúa la dilatación resultante de la absorción de calor operada al pasar materiales del estado cristalino al estado de fusión. Si bien tiende a restringir la cuantía del arrugamiento, no llega a anularlo, toda vez que los fenómenos químicos y físicos que tienen lugar en el seno de la Tierra con-

cluyen necesariamente en el aumento de la entropía, cosa que sólo es posible bajo circunstancias excepcionales: por ejemplo, en el caso de ascensiones del magma, si el volumen aumentase accidentalmente, la Tierra se contraería *en su totalidad*. La conclusión que de la actuación de presiones moderadas hay que retener, es que los materiales del interior de la Tierra tienen un grado máximo de fusión; es decir, que si la presión excede a la presión proporcional al grado máximo de fusión (cosa que verosímilmente acontece en lo profundo, donde sólo interviene una parte de la corteza terrestre), tiene lugar una *disminución* de volumen a la vez que los materiales se funden.

Chamberlin y Sonder¹ llegan asimismo a la conclusión que la contracción terrestre es resultado de una reestructuración o reorganización de los materiales del interior de la Tierra. Sonder hace hincapié en la colosal presión que acompaña a la disminución de volumen consiguiente a las transformaciones de los compuestos químicos. Pero no la presión en sí misma, sino sólo la *variación* de presión, o, a presiones iguales, la *variación* de temperatura, conducente a los cambios de volumen. Se producen variaciones de temperatura como efecto de fenómenos radiactivos y de la conductibilidad; las variaciones de presión son consecuencia de los intercambios de materia en el interior del globo, que acaban en una estratificación por orden de densidades.

§ 28

8) *La evolución tectónica de la corteza terrestre*

La transformación tectónica de la corteza terrestre es, en todas sus particularidades, una consecuencia de la

¹ TH. C. CHAMBERLIN, *The Origin of Earth*, Chicago, 1925.

R. SONDER, *Über die Ursachen der Erdkontraktion*. *Vierteljahrsschrift der Naturforsch. Gesellsch. in Zürich*, t. 67, 1922.

contracción del interior del globo. En virtud de esta contracción se produce en la corteza del mismo una tensión elástica que cada vez alcanza mayor intensidad. Al cabo de cierto tiempo acarrea la formación de amplias bóvedas u ondulaciones de gran radio («Undaciones» de Stille), las cuales no son compensadas isostáticamente. Porciones del fondo del océano emergen; extensas zonas continentales se sumergen. Se inicia el período de las inundaciones continentales. Cuando las tensiones corticales alcanzan un cierto grado, sobreviene un equilibrio. En algunos lugares débiles la corteza se rompe; las áreas correspondientes a zonas de fractura se desplazan por arriba y por debajo y se pliegan en la profundidad (Ondulaciones de Stille). Al mismo tiempo la tensión en la corteza disminuye; la tendencia al equilibrio isostático aumenta. Las ondulaciones del suelo comprimidas hacia afuera vuelven a hundirse, y en su virtud el mar vuelve a ocupar sus antiguos dominios; las áreas continentales sumergidas vuelven a emerger. Al mismo tiempo las zonas plegadas emergen en forma de montañas, pues las masas corticales más ligeras, hundidas en la profundidad, experimentan el empuje, hacia arriba, de las más pesadas que las circundan en el substratum.

El ritmo con que alternan las orogénesis y las epigénesis nos induce a explicarnos la evolución de la materia terrestre como un proceso continuo, el cual tiende a un cierto fin, pero sin constituir una línea recta, porque las transformaciones y los intercambios que en aquélla se operan flucúan o varían con el tiempo. Oscilando la naturaleza y la intensidad de las mismas, no debe chocarnos que los fenómenos concomitantes de las grandes contracciones puedan ser independientes de otros para los cuales la intensidad de la contracción es menor. Aquí se presume otro origen o causa, pues al contraerse el interior del globo, ocurre que en la corteza y en el substratum suyo, hasta una profundidad en la

cual la irradiación del calor afecta todavía al descenso de la temperatura y acarrea un incremento de la cohesión, sólo resultan reforzadas las fuerzas tangenciales: en su virtud, prodúcense enérgicos alabeamientos cuando tales fuerzas han alcanzado un determinado valor límite, pero si guese un rápido *equilibrio* de tensiones, a consecuencia del cual la corteza se pliega en las zonas más endebles, que son los geosinclinales. El proceso es parecido al que tiene lugar en un montón de ramos abandonados al influjo de la humedad; que se «levanta», irguiéndose.

En casos particulares, puede afirmarse respecto de los fenómenos epirogénicos y orogénicos, que la corteza terrestre no es homogénea; en ella alternan rocas cristalinas y sedimentarias. El módulo de elasticidad de estas rocas es muy variable, pequeño relativamente en los sedimentos, grande en las rocas cristalinas. Al crecer la tensión tangencial en la corteza terrestre, las rocas con pequeño módulo se comprimen más fuertemente, su infraestructura se arruga y cede más dócilmente que la de las otras rocas. De este modo se explica que las cuencas de sedimentación (los geosinclinales) se hundan durante los períodos anorogénicos, es decir, en épocas de tensión cortical creciente, y que, en cambio, las áreas cristalinas, los llamados escudos (Escandinavia, Africa central, Arabia, Brasil) se abovedan como ondulaciones¹.

¹ Las porciones corticales menos sensibles a la presión absorben la mayor parte de la fuerza; constituyen el armazón de la corteza, mientras que las zonas de mayor compresibilidad vienen a formar ventanas entre las primeras. Aquéllas se abovedan según las resultantes de las grandes presiones tangenciales, mientras que éstas, más fácilmente comprimibles y, por tanto, más dóciles al arrugamiento, experimentan un relativo hundimiento (Sonder, op. cit., p. 229).—A consecuencia de las dobladuras terrestres, no sólo se abovedan hacia afuera los escudos cristalinos, sino también las zonas de hundimiento; pero las zonas de hundimiento son menores que los escudos, a igualdad de tensiones.

De lo dicho se deduce una explicación sencilla de la tendencia

Sobre las áreas de tierras firmes sumergidas se depositan nuevos sedimentos; circunstancialmente, pueden emerger, y volverse a hundir. En los periodos de plegamiento general que les siguen tienen lugar, en cambio, los grandes diastrosismos. Puesto que los geosinclinales constituyen los lugares más débiles de la corteza, en ellos tiene efecto el equilibrio de las tensiones, equilibrio que tiende a un acortamiento de la corteza. En todos los ciclos persisten las zonas de hundimiento indicadas, en tanto que las áreas cristalinas, resistentes, representan las regiones sólidas permanentes.

De los geosinclinales se levantan las montañas de plegamiento. El levantamiento es una consecuencia del empuje que hacia arriba, y sobre los sedimentos plegados en la profundidad, ejercen las masas más pesadas que actúan lateralmente en la infraestructura. Pero como las masas más pesadas desalojadas de la infraestructura de las montañas plegadas tienen la tendencia a discutir hacia su antigua localización y a desalojar las masas más ligeras que aquí se encuentran ahora, estas últimas también manifiestan a su vez tendencia análoga, puesto que en la profundidad adquieren plasticidad y, por consiguiente, procuran expandirse horizontalmente; efecto de todo ello es que vuelva a disminuir algo el empuje, hacia arriba, de los plegamientos montañosos. A guisa de un iceberg que se funde por su cara inferior, una

de los geosinclinales a hundirse durante los tiempos anorogénicos. Antes fué planteada la duda de si los geosinclinales se hunden porque experimentan nuevas cargas a causa de los nuevos sedimentos, o si son campos de sedimentación porque se hunden. Ahora puede admitirse como cierto que por lo menos el origen de las series sedimentarias extraordinariamente potentes no puede explicarse sencillamente por la mera isostasia. (A. BORN, *Isostasia y medidas de la gravedad*, Berlin, 1923, p. 139.) Una zona en que actualmente las tensiones corticales tangenciales determinan el hundimiento de un geosinclinal es, seguramente, la depresión de Ferghana. (A. BORN, *op. cit.*, p. 158.)

porción se hunde mientras el antepaís se levanta ¹, por lo menos lateralmente, es decir, por el lado donde las masas corticales comprimidas en la profundidad, elevándose lentamente otra vez, se desplazan.

Como quiera que todos los fenómenos geológicos conocidos han tenido lugar en la delgada zona cortical, cree E. Dacqué ² poder considerarlos como fenómenos externos sin importancia, ante los cuales, por el contrario, el cuerpo terráqueo, en conjunto, se comporta como intacto. Ninguna duda suscitaría esta afirmación si se demostrase la existencia de causas externas (cósmicas) que acarreasen modificaciones en la corteza. Todas las investigaciones que buscan en causas externas las modificaciones tectónicas han resultado infructuosas (véase § 11, 16-24). Por esto hay que buscar las causas en el interior. Hemos procurado determinar en los precedentes § 25-27 la clave, tamaño y campo de acción de las fuerzas actuantes. Si los resultados merecen confianza, la opinión contraria a las afirmaciones de Dacqué sería cierta en el sentido de que el interior de la Tierra fué en los tiempos arcaicos teatro de trastornos extraordinarios, y las modificaciones tectónicas de la corteza son un simple eco de los mismos.

Los fenómenos orogénicos y epirogénicos presentan numerosas justificaciones, las cuales se pueden fundamentar de una manera sencilla sobre los postulados de la hipótesis de la contracción ³.

¹ De esta manera se ha levantado, verosímilmente, el potente macizo del Colorado, equilibrado isostáticamente (A. Bonn, op. cit., p. 158), así como el altoplaís de Baviera y el Tibet.

² *Fundamentos y métodos de la Paleogeografía*. Jena, 1915, p. 185.

³ Una explicación fundamental de todos los problemas que suscita el desarrollo geotectónico y sólo para leer entre renglones, sin constituir una comprobación, pero sí una solución satisfactoria de los mismos mediante la hipótesis de la contracción, aparece con sumo acierto en la obra de H. Stille, *Grundfragen der*

1. No son de naturaleza local, sino que se extienden de una manera simultánea y en igual sentido sobre toda la Tierra. Fenómenos de tan poca importancia relativa como la alternancia de estratificación de las rocas sedimentarias dentro de las formaciones aisladas, se realizan de una manera simultánea en regiones incluso muy alejadas entre sí (véase § 5). Esto obedece a una causa general, la cual sólo puede ser de origen endógeno. La hipótesis de la contracción suministra a estos hechos una explicación satisfactoria.

Que el plegamiento de las Cordilleras tuvo lugar algo antes que el plegamiento de los Alpes no constituye una objeción. El momento de la iniciación de las tensiones no está sólo determinado por la intensidad en sí, sino además por la cuantía de la resistencia que ofrece la zona que se pliega. El sinclinal de las cordilleras estuvo ya maduro antes que el sinclinal Alpino.

2. Las transgresiones aumentan paulatinamente, mientras que las regresiones se inician de un modo súbito. El lento aumento de las transgresiones corresponde al paulatino aumento de las tensiones en la corteza terrestre; el rápido ritmo de las regresiones corresponde, empero, al brusco equilibrio y a los movimientos subsiguientes a la compensación isostática.

El juego alternativo de las transgresiones y regresiones en muchas áreas geosinclinales permite suponer que el empuje cortical creciente que actúa sobre estas áreas cubiertas por el mar puede disminuir algo en lugar y tiempo: en una palabra: si este empuje origina rupturas en las masas comprimidas, se produce a lo largo de ellas un acortamiento por efecto de las traslaciones.

La tensión en la corteza terrestre no parece ser igual en las diversas direcciones. Puesto que, de actuar en di-

vergleichenden Tektonik, Berlin, 1924. El desarrollo cíclico a lo largo de cada una de las Eras geológicas está tratado con gran acierto también.

receión meridiana o en dirección latitudinal, la tendencia a hundirse del área geosinclinal se hará sentir en una dirección o en otra. También el aumento o la disminución de la tensión puede producirse con diversa velocidad según varíen las direcciones; entonces ambos no son fenómenos continuos, sino que dependen, de maneras muy diversas, de las circunstancias de lugar (potencia y compacidad de las capas, y además, presencia o ausencia de discontinuidades, fracturas, recubrimientos). De esta manera explica A. Karpinsky las transgresiones del Este europeo, que alternan según las direcciones meridiana y latitudinal.

3. Los fondos oceánicos tienen carácter cristalino, según la opinión más generalizada (véase § 2), y en todo caso sólo están cubiertos por una delgada película de sedimentos. Durante los tiempos epirogenéticos, estos fondos se abovedan, análogamente, por tanto, a lo que hacen los escudos cristalinos continentales. Si los escudos oceánicos emergen del nivel del mar, aparecen entonces puentes continentales, los cuales se extienden ampliamente y pueden constituir zonas terrestres de unión entre las antiguas masas continentales. Las masas acuáticas rechazadas fuera de las cuencas oceánicas refuerzan las transgresiones en las áreas epicontinentales. Cuando después de los tiempos orogénicos, después de las fases de plegamiento, o en los períodos epirogenéticos, a causa de la producción de fracturas y de los desplazamientos las tensiones de la corteza terrestre ceden, otra vez los puentes continentales se sumergen en el mar. Esta nueva sumersión se efectúa, según el párrafo 2, con mayor rapidez que la emersión, pero siempre abarca un tiempo relativamente dilatado, pues el abovedamiento sólo implica leves perturbaciones gravíficas, y la plasticidad de las masas subcorticales es débil (A. Born, op. cit., p. 96 y 116).

Con la idea de las emersiones y sumersiones de los con-

linentes-puentes se relaciona la hipótesis de Ch. Darwin sobre el origen de las islas de coral pacíficas. Que los arrecifes se hundan hasta profundidades en que ya no pueden vivir los corales, lo atribuye él a un hundimiento del fondo del mar, en virtud del cual queda detenida la actividad constructiva de los corales. En contraste con ello, ve G. Molengraaff¹ en el movimiento hacia abajo de las islas de coral un fenómeno isostático. La sobrecarga del fondo del océano a causa del material volcánico expulsado, debe de originar un hundimiento localizado. Esta explicación suscita varias reflexiones. Por de pronto, no está comprobado, ni es verosímil, que todas las islas coralinas tengan actividad volcánica; y además, el hundimiento invocado para muchas islas volcánicas, en términos de varios centenares de metros, no exige como imprescindible la hipótesis poco viable de grandes masas de materiales volcánicos. Que los movimientos eustáticos², u otros, del océano (p. e., elevación del nivel del mar a causa de la fusión de masas de hielo pleistocenas) tienen escasa influencia para el hundimiento de las islas de coral, ha sido ya demostrado desde varios puntos de vista.

Si el fondo oceánico a 1.000 m. no está compensado isostáticamente, la corteza tiene que soportar una presión gravífica aproximada de 1.000 kg. por centímetro cuadrado para mantener el equilibrio. Hasta que se presenten plegamientos en los períodos orogénicos, la tensión cortical tiene que llegar a ser de unos 7.000 kilogramos por centímetro cuadrado (véase § 11 b). Basta, pues, una fracción de la misma para abovedar los puentes continentales anisostáticamente. Puesto que el aumento de la tensión cortical hasta su máximo valor no es permu-

¹ Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam, Proc., t. 19.

² Se designan por Suess eustáticos aquellos movimientos de las masas oceánicas originados por modificaciones en la configuración del fondo del mar, p. e., a causa del hundimiento de los zócalos submarinos, por la sedimentación, etc.

mente, sino que experimenta numerosas alternativas, los puentes continentales pueden emerger y hundirse varias veces. El lomo atlántico es, tal vez, un puente continental en formación.

4. Las principales zonas de plegamiento se disponen en dos direcciones aproximadamente perpendiculares entre sí: meridiana, la de las Cordilleras, y latitudinal, la de los Alpes. La tensión que actúa en todos sentidos en una corteza esférica aparece intensificada en dos zonas que se cortan.

El origen de las guirnaldas insulares en la costa oriental asiática es, verosíblemente, el juego de interferencias entre los movimientos plegatorios mediterráneos y pacíficos, los cuales chocan entre sí. La tabla suboceánica del Pacífico se desplazó a modo de cuña hacia el Norte¹, comprimió los pliegues mediterráneos por su lado occidental a modo de abanico y empujó los pliegues más extensos según su dirección longitudinal, a modo de arco. En el lado americano ese empuje sólo aparece en un punto: en el arco antillano, y de una manera harto intensa². La opinión de F. v. Richthofen

¹ El movimiento de la meseta batial del Pacífico parece persistir aún en la actualidad. A consecuencia del gran terremoto de California en 18 de abril de 1906, prodújese un desplazamiento de las zonas inmediatas a la costa con respecto a las zonas situadas más al E., que alcanzó a 6 m.; y con motivo del terremoto central japonés de 20 de octubre de 1891 la zona situada al E. de la fractura originaria del terremoto se desplazó muchos metros hacia el Noroeste.

² Naturalmente, no debe deducirse que el arco antillano, en sí, dé idea de la escala a que el empuje se ha realizado. El empuje solamente lo ha acentuado. También en el interior de la cuenca mediterránea, p. e., los Pirineos, Apeninos y Cárpatos representan fragmentos de arcos secundarios plegados, los cuales se ensambLAN arqueándose a lo largo de la línea directriz del plegamiento. Estos arcos secundarios forman, quizá, el festón de escudos que fueron arrancados, rompiéndose, por el desplazamiento global de los geosinclinales con respecto a la zona de plegamiento o a las zonas inmediatas a ella.

y A. Wegener en el sentido de que las guirnaldas insulares sean producto de tracciones violentas, no es aceptable (véase § 17).

5. El plegamiento principal es precedido en los tiempos epirogenéticos por algunos plegamientos previos más pequeños, de carácter más bien local, en lugares donde la solidez de la corteza no es rebasada por la tensión creciente. Preliminares del plegamiento alpino fueron, según H. Stille, los pliegues kimmerídgicos y presenonenses del Norte de Alemania, por ejemplo. La tensión tiende a impedir cualquiera diferencia de esfuerzos entre una dirección y otra. Donde la resistencia es demasiado débil, la corteza tiene que ceder.

6. Durante los tiempos orogénicos no todos los geosinclinales se resuelven en plegamientos. Puesto que la sedimentación no se efectúa de la misma manera en todas partes, los plegamientos se circunscriben a los sinclinales¹ maduros.

El gradiente geotérmico, cada vez más suave en las capas exteriores, hace que la corteza terrestre rígida sea más compacta y, por tanto, más resistente. De esta manera se explica que los plegamientos de los períodos primarios estén más extendidos que los terciarios. Determinados geosinclinales no han vuelto a ser zonas de plegamiento, y los otros se han empequeñecido (véase § 7).

7. No se forman posteriores plegamientos en los mismos puntos del geosinclinal, como anteriormente. El área ya plegada presenta contra el arrugamiento una mayor resistencia que la no plegada, pues se ha hecho más compacta a causa del ascenso e intrusión de masas mag-

¹ Una área de plegamiento relativamente madura puede permanecer respetada por el plegamiento si está englobada en un espacio resistente, el cual sea capaz de invalidar la presión tangencial y desviarla en derredor de la zona (A. BORN, Ein Beitrag zur Gebirgsbildung des varistischen Bogen. *Geol. Rundsch.*, t. 12, 1921).

máticas. El plegamiento se desplaza con cada ciclo (Emigración de los bordes continentales, según H. Stille).

8. El transporte de masas producido por el desplazamiento global de las capas de los geosinclinales hacia las zonas de plegamiento determina, en general, un hundimiento isostático de las masas plegadas. Siendo éstas de menor peso específico que las masas plásticas profundas, se elevan superficialmente como montañas algo más altas que sus alrededores. La compresión de los plegamientos montañosos no es (o por lo menos lo es en grado pequeño) un efecto inmediato del plegamiento, sino un fenómeno isostático que más bien le acompaña¹. En contraposición a la elevación isostática de los plegamientos montañosos, en las épocas anorogénicas los movimientos epirogénicos se producen en virtud de tensiones corticales crecientes, de una manera anisostática.

9. Los plegamientos montañosos tienen, en la mayoría de los casos, una estructura unilateral. Esto no se explica por la unilateralidad de la presión (pues siempre la presión y la fuerza resistente son iguales entre sí), sino por la diferencia entre las circunstancias geológicas y geofísicas que se dan a uno y a otro lado del geosinclinal. Sólo de una composición, estructura y nivel idénticos en los dos bordes del geosinclinal que se comprimen mutuamente cabe esperar una apariencia simétrica de la cordillera formada. Toda discrepancia en los materiales pétreos y en la elevación relativa de los blo-

¹ Según A. Born (op. cit., p. 70), la isostasia desempeña papel secundario en los fenómenos orogénicos; es enemiga de la orogénesis y procura volver a igualar sus consecuencias. A nuestro entender, el plegamiento sólo tiene que ver con una parte de la Orogénesis, que no es ningún fenómeno isostático, pero no con el levantamiento de las masas plegadas con respecto a las regiones inmediatas. Puesto que los fenómenos orogénicos abarcan períodos geológicos enteros, el plegamiento y el levantamiento de las capas plegadas pueden efectuarse bajo el control de la isostasia.

ques corticales marginales tiene que desencadenar un sinnúmero de variaciones, como acontece en casi todas las montañas de plegamiento. La distinta compacidad de las rocas hace que el orógeno sea más o menos unilateral; la no coincidencia entre los niveles da lugar a que el borde más bajo sea montado por el más alto y comprimido hacia lo profundo. Las masas plásticas allí existentes son obligadas a desplazarse lateralmente. En el último caso, aparecen, como ocurre en los Alpes, crecimientos de gran envergadura, que producen el mismo efecto que si las masas incluídas en lo profundo hubiesen sido succionadas de una zona a modo de unas fauces. Que realmente el fenómeno haya obedecido, no a una fuerza de atracción, sino a una fuerza compresora capaz de obligar a las masas a sumergirse por debajo de otras, se comprende si tenemos en cuenta que ellas no están laminadas, adelgazadas ni estiradas, sino apretujadas y revueltas consigo mismo, en la zona radical, o de raíces, en que aparecen zambullidas, buzando hacia lo profundo¹.

En los períodos geológicos más primitivos, en que el manto terrestre se habría consolidado en una delgada película superficial, los geosinclinales estaban todavía poco delimitados. Sucesivamente fueron caracterizándose como zonas de plegamiento más y más marcadas. Que

¹ Según L. Kober y Stille (*Estructura de la Tierra*, Berlin, 1921), las capas de los geosinclinales actúan sobre los dos lados como el antepais del sinclinal. De manera análoga se declara F. Kossmat (Las cadenas mediterráneas en sus relaciones con el equilibrio gravífico de la corteza terrestre. *Abh. Sächs. Ak. d. Wiss., Math.-phys. Kl.*, t. 38, 1921).

En la mayor parte de los Alpes el plegamiento está dirigido hacia el Norte; en los Alpes orientales del Sur, los Dinaridos, y en las montañas balcánicas con ellos relacionadas aparece orientado hacia el Sur. Las dislocaciones originadas por el plegamiento alpino son a veces colosales; muchas capas están descansando a modo de pliegues dobles, durante cientos de kilómetros, sobre otros estratos más modernos, sobre los cuales se han deslizado. (Estructura en *charriage* o corrimiento de los Alpes.)

las pizarras cristalinas arcaicas están plegadas según las direcciones más diversas por todos los ámbitos de la Tierra, es verosímelmente debido no tanto a desplazamientos laterales a causa del arrugamiento del interior de la Tierra como a corrientes en el magma fluido, motivadas por la solidificación, y que se traducen o bien en corrientes caloríficas o bien en movimientos turbulentos producidos por los escudos que se hunden.

10. Así como la formación de las montañas comprende varias fases, tampoco se producen las transgresiones ni las regresiones de una manera continua, sino más bien con alternativas. Así se explica la alternancia de capas en las rocas sedimentarias. Los fenómenos de contracción originados en el interior de la Tierra, aunque no de manera uniforme, se producen de una manera casi continua; pero las modificaciones que a causa de aquellos fenómenos aparecen en las masas resistentes de la corteza terráquea sólo se hacen patentes cuando la contracción ha adquirido una cierta importancia.

Con toda probabilidad las capas de la corteza se han formado también de una manera discontinua (véase § 3).

11. Mediante los fenómenos de plegamiento, el magma profundo ha podido llegar hasta la superficie aprovechando las fracturas que se produjeron.

Los períodos de plegamiento son, pues, simultáneamente períodos de actividad magmática intensiva. La potencia de las intrusiones depende de la intensidad del fenómeno plegatorio y de su duración. Las intrusiones aparecen especialmente en las fases finales del plegamiento, y precisamente en el lado interno de la zona plegada, que es donde el plegamiento comenzó, y las capas corticales están más larga e intensivamente arrugadas y entrecruzadas. Puesto que no todos los plegamientos montañosos presentan intrusiones, en su formación desempeñan también, sin duda, algún papel las particulari-

dades físicas especiales de las capas sometidas al plegamiento, o en el substrátum plegado.

12. A consecuencia de los fenómenos de plegamiento, las zonas inmediatas a las áreas plegadas se fragmentan en escudos. Las dislocaciones representan una «prolongación del plegamiento en otros medios»¹ (véase también § 14). Según H. Stille, la variedad de las formas tectónicas, desde las montañas en bloque, por un lado, hasta las montañas de recubrimiento, en el otro extremo, se explican no por la diversidad y variado grado de las fuerzas actuantes, sino por la distinta naturaleza de los materiales.

13. Los alabeamientos de la corteza en los geosinclinales y sus cercanías, tan grandes y de tantos matices en su aspecto y en su génesis, afectan, naturalmente, a la infraestructura. Las masas, que tienen allí una plasticidad secular, son estrujadas hacia los bordes, obligadas a apartarse, resbalando apretujadas hacia arriba, hasta tener que abrirse paso entre las porciones suprayacentes de la corteza dura. La subsiguiente pesantez somete a estas masas plásticas a nuevas condiciones de equilibrio isostático. Tienen lugar movimientos en forma de corrientes. Si se comprimen en forma de tumores, resbalan separadamente; si se apretujan hacia los bordes las masas procedentes desde lo profundo, procuran refluir. Estas corrientes representan, pues, esfuerzos de carácter secundario. Obligan a los fragmentos corticales a hundirse o a elevarse; tiran de ellos hacia el punto donde se inicia el movimiento. En la propia corteza estos movimientos se traducen en tracciones y empujes. Resultado de ellas son desplazamientos, inversiones, fracturas y hundimientos. La idea de corrientes subcorticales no es, por tanto, una hipótesis recusable, a *limine*. No hay duda de la existencia de movimientos en forma de co-

¹ H. Cloos, *Der Mechanismus tiefvulkanischer Vorgänge. Sammlung Vieweg*, cuad. 57, 1921.

rientes en el substrátum de la corteza; sin ellos tampoco sería factible el desplazamiento de materia y el consiguiente apilamiento de las capas según sus densidades. Pero esas corrientes no son—como quiere la hipótesis de las corrientes profundas—la causa primaria de las transformaciones tectónicas; su importancia sólo es relativa y de efectos limitados en el espacio como fenómeno secundario.

14. Las undaciones son abovedamientos anisostáticos. Los campos de hundimiento presentan, por esto, una hinchazón; los escudos abovedados tienden a hundirse. Esta distinta tendencia de movimientos puede traer consigo la formación de fracturas. Puesto que los abovedamientos son extraordinariamente planos, su origen no debe relacionarse necesariamente con la formación de fracturas. Lo mismo ocurre con los movimientos isostáticos. El hundimiento y emersión del escudo escandinavo en los tiempos glacial y postglacial no está acompañado, p. e., de fracturas longitudinales (A. Born, op. cit., p. 112).

15. Las masas situadas en una capa de tránsito entre la corteza compacta y su substrátum de plasticidad secular, al estar sometidas a un esfuerzo de presión no se rompen, como las masas corticales, pero tampoco son susceptibles, como un fluido, de adaptarse a cualquier espacio, sino que participan de las propiedades de una y de otro. Se fragmentan, como las masas de la corteza, en bloques o escudos, aunque sin presentar bordes precisos, y se deslizan como un fluido, pero sin alcanzar un equilibrio de presión. Sólo se deslizan allí donde están dos fragmentos en contacto. Bajo la acción de los empujes y de la pesantez se desarrolla en las caras limitantes la mayor parte del calor que resulta del trabajo de fricción y de gravitación. Este calor plastifica a las masas profundas. Por esto, las caras limitantes se transforman en superficies de deslizamiento, y la zona reca-

lentada acaba por ser un magma «viviente». Los nidos de magma que nutren a los volcanes no son, pues, reservorios en los cuales se han conservado, desde los tiempos primitivos, rocas flúidas cuyo origen o procedencia se ignora, sino zonas en forma de redes o trabéculas que se insinúan a través de toda la infraestructura cortical, en las cuales el trabajo gravitatorio y de fricción se transforma en calor, que modifica la estructura molecular de las rocas.

Los alabeamientos y arrugamientos de la corteza producen presiones sobre el substrátum de la misma, las cuales obligan a las masas magmáticas a subir. Incluso en los periodos de epirogénesis pueden producirse efusiones que cubren grandes superficies, si la corteza profunda se fragmenta en grandes escudos; por esto mismo se producen fusiones magmáticas de un modo análogo a las que aparecen, en poca extensión y de una manera esporádica, en los geosinclinales; aquéllas, en cambio, son mucho más importantes en intensidad y en superficie.

Que las masas eruptivas que ascienden desde amplias bases y que se incrustan entre las masas corticales superiores, o las funden, pudieran llegar hasta la superficie (hipótesis del over-head-stopping, de R. A. Daly), ha sido puesto en duda por las investigaciones de H. Cloos. El ha demostrado que muchas masas eruptivas que hasta aquí se consideraron como batolitos, como el Wald (Selva) de Baviera¹, son efusiones eruptivas por fracturas. Esto se comprende fácilmente desde el punto de vista de la contracción. Al aumentar las tensiones, las bolsadas de materias sílicas, menos resistentes, quedan comprimidas entre las masas sílicas, y se escurren lentamente a lo largo de pequeñas fracturas. Pero para la ascensión de los batolitos es difícil dar con una causa suficiente.

¹ Kurze Beiträge zur Tektonik des Magmas. *Geol. Rundsch.*, t. 14, 1928.

16. A la presión productora del plegamiento corresponde en la dirección longitudinal de los pliegues una tracción. Si es posible un apartamiento lateral de las masas inmediatas a la zona de plegamiento, aparece entonces una fosa (fosa del Rin, fosa del Jordán). Las fosas del Africa Central son quizá hendiduras, las cuales se originaron cuando la tabla continental africana destacó hacia el N. un fragmento con motivo del plegamiento mediterráneo, por lo cual la porción de la misma, situada al Sur del Ecuador, experimentó un ensanchamiento paralelo a éste, a consecuencia de la configuración elipsoidal de la Tierra ¹.

Las fosas continentales son producto de estiramientos.

17. Con motivo del plegamiento del área circumpacífica, la tabla pacífica resistente se desplazó a guisa de cuña entre las tablas asiática y americana hacia el Norte. Puesto que las masas continentales situadas a igual nivel que el fondo oceánico estaban a mayor temperatura y, por consiguiente, eran más maleables que la tabla oceánica comprimente, se construyeron debajo del borde continental en vías de plegamiento. Quedaron incrustadas al borde continental oblicuamente. De esta manera se originaron las fosas. (Explicación de E. Suess ¹)

¹ E. KRENKEL. *Las zonas de fractura de Africa*. Berlín, 1922.

Aunque el Mar Rojo representa una fosa, hay que pensar en un desgarrón, el cual se formaría a causa de que la tabla continental africana, acercándose a Arabia y soldándose con el bloque continental asiático, ejerció presiones hacia el Norte, en la cuenca mediterránea, pero encontró una resistencia en el bloque continental asiático, por lo cual el ángulo norte-oriental de Arabia se dislocó, y un pedazo se habría desplazado hacia el Nordeste; al mismo tiempo, taladró al Norte el estrecho de Ormuzd, en la zona de los plegamientos pérsicos.

¹ Véase E. Houx, *Über die geologische Bedeutung des Tiefsee-gräben*. *Geol. Rundsch.*, t. 5, 1914.

En la fosa de Nueva Pomerania, situada no en el lado oceánico sino en el lado continental de la serie de islas que la acompañan, las circunstancias se complican, debido a que en el dominio insu-

Las fosas submarinas son producto de empujes.

18. Las zonas de plegamiento y de fractura son asimismo las principales áreas sísmicas. Los terremotos ponen de relieve también que todavía en la actualidad hay tensiones tangenciales en la corteza terrestre. La contracción del globo terráqueo no ha llegado aún, pues, a su término.

§ 29

e) *Juicio crítico de la hipótesis de la contracción*

Nos llega el momento de revisar las objeciones a la hipótesis de la contracción suscitadas por diversos autores. La contracción terrestre es un hecho, según hasta aquí hemos expuesto, por lo menos en apariencia. Su mera existencia lo reafirma frente a todas las objeciones. Las conclusiones erróneas a rebatir en los argumentos aislados no son problema difícil. Por desgracia se ha seguido en las conclusiones independientes entre sí que se han establecido acerca de los fundamentos de la evolución geológica un procedimiento que puede ser poco equitativo. Muchos dirigen invectivas a la hipótesis de la con-

lar postíndico y norteamericano interfieren los pliegues mediterráneo y pacífico.

La idea antes expuesta acerca del origen de las fosas se relaciona con la de F. Kossmat sobre los hundimientos del borde de los plegamientos montañosos (Las cordilleras mediterráneas, etc. *Abh. d. Süchs. Akad. d. Wiss., Math.-phys. Kl.*, t. 38, 1921). Según Kossmat, las montañas inmediatas a las fosas tiraron hacia abajo la porción limitante en virtud del hundimiento en el substrátum, a causa de su asociación elástica con el anto-país.

La idea de que las fosas sean hundimientos de ruptura (P. PRELEWITZ, Las fosas en el Océano Pacífico. *Geogr. Zeitschr.*, t. 14, 1918), es poco verosímil, porque es difícil comprender cómo la tabla pacífica pudo desprenderse de las tablas continentales limitantes y originar fracturas en los bordes. Tampoco las cordilleras ni las guirnaldas insulares asiáticas son horsts, sino cadenas plegadas por la presión lateral.

tracción, como si su influencia fuese algo largamente indefinido; no se creen obligados a comprobar la solidez de sus fundamentos. Se explica ello si se tiene en cuenta que en muchas obras la hipótesis aparece con la vida de una Centineta. Pero una vez que se la libra del ropaje que la desfigura y se le coloca el que le corresponde, cabe reconocer lo que la hipótesis es en sí misma.

En las páginas que siguen, las objeciones van encabezadas con los nombres de los autores que las esgrimen¹. Los defensores de la hipótesis ya han dado argumentos poderosos en su favor². Desgraciadamente, como ya Jeffreys ha lamentado, han surgido nuevas dificultades y dudas relacionadas con la hipótesis de la contracción.

Se pueden agrupar las objeciones en dos grupos. Hay un cierto número (1 al 6) que son esgrimidas directa-

¹ O. AMPFERER, *Über das Bewegungsbild von Faltegebirgen. Jahrb. d. K. K. geol. Reichsanstalt*, t. 56, p. 539, 1906.—K. AXNER, *Über die Bedingungen der Gebirgsbildung*, p. 6, Berlin, 1914.—S. von BONNORF, *Grundprobleme der Geologie*, p. 222, Berlin, 1931.—A. BORN, *Bewegungsmechanismus der Erdkruste*. Vol. III del *Lehrbuch der Geophysik*, editado por B. Gutenberg, p. 126, Berlin, 1929.—C. E. DUTTON, *On some of the greater problems of physical Geology*, *Bull. Phil. Soc. Washington*. Vol. XI, p. 51, 1892.—A. HOLMES, *Radioaktivität und die thermische Geschichte der Erde. Die Naturwissenschaften*, 19. Jahrgang, 1931, p. 73.—E. HAARMANN, *Die Oszillationstheorie*, p. 7, Berlin, 1930. B. LINDEMANN, *Kettengebirge*, p. 1, Jena, 1927.—H. QUIRING, *Über das Problem der Krusten- und Gebirgsbildung. Geol. Rundschau*, t. 11, p. 193, 1920.—E. REYER, *Geologische Prinzipienfragen*, p. 140, Leipzig, 1907.—M. P. RODZKI, *Physik der Erde*, p. 118, 215, Leipzig, 1911.—C. G. S. SANDBERG, *Geodynamische Probleme*, II parte, p. 39, Berlin, 1924.—K. SCHNEIDER, *Zur Frage über die Ursachen geotektonischer Bewegungen. Geol. Rundschau*, t. 8, p. 1, 1917.—A. WEGENER, *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*, 4.ª edición, p. 8, Braunschweig, 1929.

² H. JEFFREYS, *The Earth*, p. 278, Cambridge, 1929.—H. STILLE, *Die Schrumpfung der Erde*, Berlin, 1922.—FR. NÖLKE, *Kritische Rechtfertigung der Kontraktionshypothese. Germanys Beiträge zur Geophysik*, t. 38, p. 172, 1933.

mente contra el aspecto meramente teórico; otro (7 al 23) que intenta echarla abajo mediante las deducciones de determinados hechos de observación.

1) *Enfriamiento de la Tierra.*—«La supuesta contracción terrestre es, según la hipótesis, una consecuencia del enfriamiento acarreado por la pérdida de calor. Para sostener la tesis del arrugamiento allí implícita habría que tenerse en cuenta que la Tierra, al comenzar su vida geológica, estaba muchos miles de grados más caliente que en la actualidad, cosa que es imposible. Además no explica por qué la Tierra se enfría, puesto que, en virtud de la desintegración de los elementos radiactivos, el calor liberado es acaso mayor que el que se pierde por radiación». Dutton, Lindemann, Quiring, Schneider, A. Wegener.

La Tierra no se contrae y arruga porque lance su calor, sino porque tienen lugar en ella fenómenos intraterrátricos de carácter físico y químico, que son acompañados de una disminución de volumen. La Tierra, lo mismo que los restantes planetas del sistema solar y el mismo Sol, han salido de un fragmento de una nebulosa cósmica decadente, de estructura irregular. La Física y la Astrofísica proporcionan jalones por los que se puede seguir la evolución de las masas cósmicas nebulosicas; por ellos cabe también reconstruir la embriogénesis pregeológica de la Tierra. El argumento carece de absoluta importancia; el problema, que aisladamente subsiste, no borra el carácter de continuidad del conjunto.

En las nebulosas se forman corpúsculos de cristalización que pueden ser considerados como partículas metéóricas pulverulentas. Estas gravitan mutuamente y acaban por reunirse en nubes meteóricas que cada vez son más densas. La degradación de la energía de las partículas y, por consiguiente, también del calor originado por su entrechoque, es muy leve al principio. El cuerpo que se origina es, por tanto, casi absolutamente

frío en su interior. En cuanto ha alcanzado un determinado tamaño, lo calientan las nuevas masas que sobre él caen con profusión cada vez mayor. Finalmente, alrededor del núcleo meteórico frío, atravesado por gases nebulósicos fuertemente comprimidos, fórmase una atmósfera ardiente. Cuando casi todas las masas nebulósicas inmediatas a los planetas han sido consumidas por éstos, las capas atmosféricas más externas comienzan a enfriarse rápidamente a causa de la irradiación. Se forman nubes de productos de condensación, las cuales se hacen cada vez más espesas y compactas. Paulatinamente las nubes que rodean al núcleo planetario se licúan y acaban por condensarse en una envoltura, que poco a poco se solidifica. Este manto o envoltura lanza parte de su calor al espacio, y parte también lo transmite al núcleo frío. Al mismo tiempo, poco a poco se hace notorio el calor radiactivo. Las masas del núcleo se calientan y se reblandecen. Como éste es una especie de conglomerado de partículas pulverulentas de naturaleza variadísima, y no formado por gases nebulósicos químicamente asociados, inicianse en el campo gravitatorio terrestre tendencias desplazatorias en forma de corrientes, cada vez más intensas. Las sustancias más ligeras son impulsadas a ascender, y las pesadas a hundirse. Bosquejase una estratificación. Paralelamente a estos intercambios de masas opérase un intercambio químico. Ascendiendo y descendiendo, las sustancias de mayor parentesco químico encuéntranse mutuamente; y viceversa; además, se modifican las condiciones de presión y temperatura. Derrócanse antiguas combinaciones y se producen nuevos compuestos. Las transformaciones que tienen lugar en el interior de la Tierra, particularmente los cambios de los gases nebulósicos (oxidación del hierro meteórico) van acompañadas, en su mayor parte, de una disminución de volumen. Si las sustancias tienen un punto de fusión máximo, la fusión, cuando la constante

de la presión que le corresponde es rebasada, acarrea una disminución de volumen (véase § 27). El intercambio de materia no ha terminado aún actualmente; por esto, la contracción todavía prosigue.

2) *Hipótesis térmica*.—«La contracción de la Tierra es eco de la irradiación de su calor. En los tiempos geológicos, sin embargo, el enfriamiento, según Jeffreys, no afecta a más de 700 km. de profundidad; el resto del interior del globo terráqueo no ha sufrido alteración en su estado térmico. A la irradiación anual de 60 cal/cm.² de la superficie corresponde un acortamiento del radio todo lo más de 1 ½ mm. en un siglo. Este coeficiente de contracción no puede explicar, ni con mucho, los plegamientos montañosos durante los períodos orogénicos». Dutton, Holmes, Lindemann, Rudzki, A. Wegener.

«Puesto que la profundidad hasta la cual llega el enfriamiento es, aproximadamente, proporcional a la raíz cuadrada del tiempo, los períodos intermedios a las orogénesis debieran obedecer a la misma ley, por lo cual no hay ningún punto de referencia o apoyo». (Holmes.)

Ambas objeciones van contra la «hipótesis térmica»¹, a la cual no cabe atribuir, conforme expusimos, los fundamentos de la hipótesis de la contracción. Es dudoso que el coeficiente de contracción y el que se deduce de los plegamientos montañosos sean comparables entre sí, como cree Jeffreys (*The Earth*, p. 286).

3) *Calentamiento de la Tierra*.—«La opinión que

¹ La hipótesis térmica ha sido tratada desde un punto de vista teórico repetidas veces; primero por G. H. Darwin (*Phil. Trans. Roy. Soc.*, A. Vol. 178, p. 242, 1887), luego por H. Hergesoll (*Gerl. Beitr.*, t. 2, p. 153, 1894) y Jeffreys (*The Earth*, p. 138). Se llega a la conclusión que la cáscara terrestre externa, al enfriarse, se divide en dos capas, la más profunda de las cuales experimenta estiramientos horizontales, y la superior sufre compresiones, horizontales también. Ambas capas están, pues, separadas por una «superficie neutral».

aboga por el recalentamiento de la Tierra es indiscutible». (Holmes.)

El argumento no se apoya sobre ningún terreno teórico o de observación, sino que se trata de una contribución puramente divulgadora, sin valor científico.

Si la Tierra se ha formado de una nebulosa cósmica, su masa estaba, al principio, en el frío absoluto, como tal masa nebulósica. También se caracterizaban temperaturas bajísimas en las nubes meteóricas que poco a poco se segregaban de la nebulosa para apelmazarse. Durante el largo fenómeno de la formación de núcleos, la atracción ejercida por el planeta en gestación llegó a ser tan fuerte que obligó a las nuevas partículas nebulósicas a caer sobre él con una velocidad grande, por lo cual sus capas exteriores se calentaron cada vez más. Sin embargo, el núcleo planetario conservó aún durante largo tiempo su baja temperatura. Las capas externas calientes se enfriaron progresivamente por la irradiación. A ellas se refiere Jeffreys cuando habla de la «historia térmica de la Tierra». El núcleo planetario tiene, empero, su historia propia. El absorbe calor del manto recalentado, y este calor, asociado al calor procedente de la radiactividad que desarrolla la materia nuclear, hace factible el «intercambio» o metabolismo del interior de la Tierra, invocado por Goldschmidt.

Sin embargo, es preciso examinar en un punto la exposición doctrinal de Goldschmidt. Según él, la estratificación por orden de densidades se ha originado en virtud de la diferenciación operada en un sistema monofásico a elevada temperatura que está en vías de enfriamiento. Esta conclusión no es viable. La transformación de una masa terrestre que actualmente se halla debajo del punto medio de condensación, origina una notable pérdida de energía potencial (un porcentaje elevado del potencial de una esfera homogénea, de igual tamaño), y a esta pérdida corresponde una ganancia calorífica de

varios cientos de calorías por cada gramo de masa terrestre. Puesto que el calor sólo en una mínima parte puede ser transmitido a la superficie por conductibilidad, y desde ésta irradiado, la temperatura del interior de la Tierra tiene que aumentar. Por el contrario, la diferenciación de un sistema monofásico sólo puede producirse, al descender la temperatura. Como el fenómeno térmico condicionador de la diferenciación se opone a ello, difícilmente puede producirse ninguna estratificación por orden de densidades.

Sólo en el caso de que una gran parte de la masa terrestre estuviese fría al principio y se calentase después, se realizarían las premisas de orden físico necesarias para la aparición de una estratificación de aquel género. Tan pronto como ciertas sustancias alcanzan el punto de fusión y su viscosidad decreciente hace posible un intercambio de masas, aparece una movilización de la materia. Los calores que desarrollan las combinaciones químicas, la gravitación y la radioactividad favorecen cada vez más dicha movilización. Poco valor tienen las temperaturas *ascendentes* que condicionan los supuestos intercambios de materia y los desplazamientos de masas en el interior de la Tierra.

Si el interior de la Tierra estuviese a temperaturas elevadas, habrían quedado detenidas en su iniciación cualesquiera estratificaciones de índole gravitatoria.

4) *Cohesión de la Tierra.*—«La cohesión del globo terráqueo es ya tan grande, que resulta inverosímil un nuevo aumento de la misma.» (Lindemann.)

Tanto cuanto persista el intercambio material en el interior de la Tierra subsistirá asimismo la posibilidad de transformación de compuestos químicos poco tenaces en otros más compactos.

5) *Trajectoria de las presiones corticales.*—«Los plegamientos terciarios, y lo mismo los precedentes, sólo se han hecho sentir en unos pocos lugares de la Tierra,

y de una manera zonal. Una contracción del interior del globo terráqueo habría dado lugar a grandes presiones tangenciales, toda vez que la corteza terrestre no opone suficiente resistencia, y estas presiones habrían afectado a grandes distancias en lugar de quedar circunscritas a algunos lugares señalados, haciéndose patentes en todas partes». (Ampferer, Andréé, Haarmann, Reyer, Rudzki, Schneider.)

A esto se argumenta la fricción que tiene lugar por el resbalamiento de la corteza sobre su substratum, como cuerpos sólidos que son. Y puesto que la propagación del alabeamiento de los cuerpos sólidos se traduce en las superficies normales a las ondas, en una fuerza equivalente a $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{4}$ de su peso, si aquella conclusión fuese exacta sólo se podría propagar en la corteza una presión horizontal de algunos kilómetros sin romperla o alterarla. Pero realmente la deformación de la corteza no se realiza sobre un substratum sólido, sino sobre una masa que, bajo la acción de presiones muy duraderas, reacciona como algo dotado de pastosidad compacta. De ahí que un movimiento superficial sólo tenga que vencer la fricción interna del substratum en que la corteza se apoya.

En nuestras anteriores disquisiciones (véase § 7) hemos señalado que si la viscosidad del substratum no excede del valor $5 \cdot 10^{22}$ g/cm., las tensiones horizontales en la corteza terrestre pueden propagarse a largas distancias. Desde diversos puntos de vista cabe deducir que la viscosidad no alcanza aquel valor, y por esto la fricción en el substratum cortical sólo implica que se pierda una parte de la fuerza plegante, y, por consiguiente, ésta puede ser casi totalmente invertida en el trabajo de arrugamiento en las zonas débiles.

6) *Las fuerzas alabeadoras.*—«La hipótesis de la contracción pretende que la propia corteza terrestre es apta para desarrollar fuerzas capaces de abombarla. Es-

las fuerzas, según Loukaschewitz, son de 700.000 a 800.000 kg./cm.², y más del doble de estos valores para Wepfer (*Vierteljahreschrift d. Naturforsch. Ges. Zürich*, Jahrg. 50, 1905, p. 135). La cohesión de las rocas es, empero, sólo del orden 1.000 a 5.000 kg./cm.². (Ampferer, Andrée, Born.)

Cuando la corteza terrestre transmite fuerzas, descansa con su casi total peso sobre su substratum. Así como la capa de hielo que flota sobre el agua de un estanque y de esta manera libera su peso, se rompe cuando la presión creciente tiende a abombarla, también la corteza terrestre, que se apoya sobre las masas profundas, soporta grandes presiones onduladoras horizontales. Pero incluso los máximos esfuerzos horizontales que en los períodos orogénicos acarrearán la producción de los plegamientos de la corteza sólo representan una parte pequeñísima de los esfuerzos que hasta de una manera independiente se encaminan a abombarla.

7) *Isostasia*.—«En la corteza terrestre predomina el equilibrio gravitatorio. Las tensiones que según la hipótesis de la contracción afectan a la corteza terrestre, tendrían que impedir la consecución del equilibrio gravitatorio.» (Dutton, Wegener.)

Es indiscutible que la corteza terrestre, en gran parte, está equilibrada isostáticamente. Este hecho no implica el que existan importantes discordancias, que incluso no son sólo de carácter local. Las anomalías locales explican la persistencia de excesos de masa, muy localizados, y déficits no compensados, debido a que la compacidad de las porciones de corteza infrayacentes es mayor que la fuerza deformadora procedente de un desequilibrio. Las anomalías de la gravedad que afectan a grandes territorios pueden atribuirse a tensiones horizontales que la corteza terrestre sufre. Las tensiones dan lugar, por lo tanto, a leves abombamientos y depresiones (Undaciones de Stille). Estos abombamientos amplísimos que-

dan sin compensar si la fuerza que los produce no rebasa el grado de rigidez de que gozan las rocas de la corteza. Pero entonces se produce, por fracturación o por plegamiento, un equilibrio energético, y la isostasia recobra sus dominios (Stille).

Si en la actualidad la Tierra es un elipsoide de tres ejes, cuyo eje ecuatorial mayor sólo excede al más corto en algunos centenares de metros, debe esta deformación a la rigidez de la corteza, que se opone al reajuste de las más leves perturbaciones de la gravedad. El esfuerzo tangencial sobre los flancos de las undaciones se calcula como una fracción del peso de las masas empujadas hacia arriba, las cuales no podrían deslizarse sobre un plano oblicuo cuya inclinación fuese la misma que la del flanco de la undación. Cuando la amplitud del abombamiento es superior a algunos miles de metros, su valor queda por bajo del valor de la rigidez de las masas corticales.

Opina Suess que los continentes, por efecto de la «fragmentación general de la esfera terrestre» han quedado como escudos empujados, y que los fondos oceánicos son bloques hundidos que al proseguir la contracción habrían podido substituirse en sus papeles respectivos: ello implica la renuncia a una determinada permanencia de los continentes y los océanos. Por aparición de las undaciones pudiera ocurrir que ciertas zonas continentales quedasen transitoriamente por bajo del nivel del mar, con la consiguiente acumulación de sedimentos marinos en las superficies continentales, y la aparición de *puentes continentales* en los océanos.

S) *Puentes continentales*.—«La idea de los puentes continentales es inadmisibile, toda vez que no habría ningún territorio en el cual pudiera concentrarse el agua desalojada.» (A. Wegener.)

A esta objeción hay que hacer notar:

a) Que no es necesario que los puentes continentales

hubiesen gran extensión ni que, por consiguiente, las oscilaciones de nivel del océano producidas fuesen de muy grande amplitud ;

b) que los puentes continentales fueron, al parecer, accidentes efímeros, de duración suficiente para hacer posibles las migraciones de las faunas y las floras, pero no tan larga que alrededor de los continentes anegados se depositasen potentes capas de sedimentos marinos ;

c) que en los distintos océanos los puentes continentales emergieron de una manera temporal y consecutiva, en cuyo caso la elevación del nivel de los mares permaneció cada vez a un mismo nivel medio ;

d) que el abombamiento undatorio que elevó a la corteza submarina sobre el nivel de los océanos y le dio carácter de puentes continentales, tuvo por contrapartida los abondamientos de análoga amplitud ;

e) que el volumen del agua de los océanos en los tiempos pregeológicos era probablemente mucho menor que en la actualidad, de la cual se toman los datos como argumentos en contra de aquellas suposiciones teóricas.

9) *Desplazamientos corticales.*—«La formación de las montañas de plegamiento se explica mejor como un apilamiento en la dirección de los movimientos que las originan, que como un arrugamiento. Que la corteza se ha desplazado sobre su substratum, es patente en muchos lugares donde la neisificación del granito en el zócalo de los bloques continentales evidencia un deslizamiento plástico con una marcada componente vertical.» (Von Bubnoff.)

Los hechos destacados son totalmente plausibles para la hipótesis. Si aumenta la tensión horizontal en la corteza, un equilibrio sólo puede aparecer cuando toda la corteza se desplaza sobre el substratum a partir de las zonas débiles, poco resistentes. Que la fricción con el substratum, y en este mismo, no supone ningún obstáculo sensible para este desplazamiento, lo hemos expuesto

en § 7. Cuando Kossmat dice que «las cadenas montañosas, y con ellas los geosinclinales, son fajas intermedias que se desarrollan allí donde campos corticales se acercan con distintas tendencia al movimiento»; cuando Argand, Staub y nuevamente también A. Heim, atribuyen los plegamientos alpinos a choque de los bloques continentales, no es que formulen sus opiniones en un campo contrario a la hipótesis de la contracción, sino que se incluyen en ella totalmente.

La idea de un desplazamiento de la corteza queda, pues, encuadrada en una amplia hipótesis de la contracción (véanse n.º 10 y n.º 16). Sólo hay que tener en cuenta que la fuerza desplazatoria no obedece a influencias exteriores (p. ej., las oscilaciones de los polos, y sus consecuencias, o a un impulso procedente de corrientes profundas), sino que procede de la tensión horizontal que la contracción terrestre determina en la corteza.

10) *Deriva continental (Epeiroforesis).*—«Para explicar las variaciones climáticas acaecidas desde el Carbonífero en algunas regiones de la Tierra, hay que recurrir a la idea de una deriva continental. La hipótesis de la contracción no concuerda con esta conclusión.» (A. Wegener, Holmes, Salomon-Calvi.)

También en virtud de la hipótesis de la contracción se han producido desplazamientos en la corteza, y tanto en toda ella como en pequeñas porciones de la misma (véanse n.º 9 y n.º 16), pero verosíblemente sólo en relación con los mismos plegamientos. Las modificaciones acarreadas de esta suerte en las coordenadas geográficas y, por consiguiente, en los climas también, son leves. Sobre esto, una objeción a la hipótesis sería justificable siempre y cuando se demostrase que las variaciones climáticas sólo pudiesen tener lugar en virtud de derivas continentales de la mayor envergadura. Pero esto

es un supuesto erróneo. Hay todavía otras posibilidades dialécticas ¹.

Además hay que hacer constar que para explicar la existencia de depósitos glaciares en Africa, Sudamérica, Australia y Sudaasia, no está aún claro que tales regiones del globo constituyesen todavía en el Pérmico una masa de tierras remidas alrededor del polo Sur.

a) Los centros de glaciación son puntos de divergencia, no zonas de acumulación. Así como las formaciones glaciares cuaternarias hubieron de acumularse a muchos miles de kilómetros de Escandinavia y Labrador, las formaciones de idéntico carácter pérmicas procedentes de las regiones próximas a los polos se habrían depositado en las latitudes medias. Si la presencia de las tilitas en dichas regiones induce a pensar no en la proximidad, sino en la lejanía de los polos, difícil resulta aceptar la opinión de que aquellas regiones estuviesen juntas durante el Pérmico.

b) El glaciario pérmico no es ningún fenómeno de conjunto para todos los continentes australes. Ese período está interrumpido por largas fases interglaciares, siendo lo curioso el que en Australia se cuenten por lo menos 5, y en Sudáfrica y Sudamérica por lo menos 2 y en Sudaasia acaso 2 solamente; en cambio, la Antártida no estuvo en el Pérmico sometida a la glaciación ². Quien crea que la glaciación pueda ser atribuida a una deriva continental ha de pensar que las regiones de la Tierra situadas entre latitudes elevadas y bajas tendrían que gozar de un movimiento análogo al del péndulo, amplísimo; y que, efectuándose este movimiento con rit-

¹ FR. NÖLKE. *Physikalische Bedenken gegen A. Wegener's Hypothese der Kontinentalverschiebungen*. *Pol. Mitt.*, Jahrgang. 1922, p. 74 y 114.

FR. NÖLKE. *Ist es notwendig, vordiluviale Eiszeiten anzunehmen?* *Zeitschrift für Gletscherkunde*, 1934.

² W. SALOMON-CALVI, *Die permokarbonischen Eiszeiten*, Leipzig, 1934.

no variable, no constituirían ninguna masa compacta y sólidamente trabada, sino que tales regiones tan pronto se separarían unas de otras como se reunirían. Este juego de los continentes al escondite sería, ciertamente, un enigma todavía mayor que la misma glaciación.

11) *Ritmo de los fenómenos tectónicos.*—«La contracción es un fenómeno constante. La intensidad de las fuerzas tectónicas ha variado, empero, muchas veces. Alternaron los períodos de grandes operaciones tectónicas con otros de relativa tranquilidad.» (Schneider.)

La idea de que al comienzo de la evolución terrestre el interior del globo terráqueo se hallaba en un estado completamente inconexo, induce a pensar que tuvieron lugar transformaciones más o menos bruscas, en vez de una prolongada «vida» tranquila. Incluso para el interior de la Tierra los períodos epirogénicos fueron verosímilmente períodos de calma, durante los cuales el equilibrio gravitatorio físico y químico subsistente con carácter estable, sería a la larga un equilibrio lábil. Con la inestabilidad se intensificó también la contracción, debido a que o bien las masas propicias a sufrir transformaciones químicas en grandes zonas habrían alcanzado su sazón para experimentarlas, o bien se produjesen grandes corrientes que al introducir cambios de temperatura y de cohesión habrían modificado el equilibrio gravitatorio de las masas.

12) *Variaciones de nivel.* «A lo largo de las desgarraduras de la corteza se han producido dislocaciones. Pero para levantar a los escudos corticales sobre su nivel actuarían presiones horizontales, a las cuales ninguna roca podría resistir.» (Huarman.)

Sólo a la acción directa de presiones horizontales se deben, en una mínima parte, los cambios de nivel experimentados por los escudos continentales. Ya hemos visto que no sólo ellas son causa de cabalgaduras, sino que también producen flexiones y fallas. Los hundimientos

y las emersiones guardan relación, en las zonas profundas, con los fenómenos engendradores de los terremotos. Si la corteza terrestre se deforma bajo la acción de fuerzas horizontales, las masas del substratum cortical, que tienen plasticidad lenta, secular, son obligadas a ondularse; es decir, tienen que elevarse y hundirse aquí y allá. Si son fuertemente comprimidas, tienden a hundirse, y si son empujadas hacia abajo por los escudos, tienden a refluir. En ambos casos, la corteza experimenta esfuerzos en dirección vertical, y a lo largo de las desgarraduras que se producen, los fragmentos corticales pueden ser empujados hacia arriba o hacia abajo.

13) *Estiramientos, tracciones.*—«La existencia de estiramientos en la corteza, grietas, fosas, no es compatible con una contracción.» (Haarmann, Lindemann.)

Toda presión orientada en un determinado sentido ocasiona una tracción en la dirección perpendicular. El plegamiento del cinturón de cordilleras mediterráneo acarreado, entrecabrió los escudos africanos separadamente. Se fraguaron así las fosas del Africa oriental y la grieta del Mar Rojo. «Africa se nos aparece como un contrafuerte agrietado, mientras su parte Norte se plegaba.» (Stille.)

Las montañas del Este asiático no son, según los nuevos investigadores, los bordes de fracturas producidas por tracciones o estiramientos, sino que por su estructura se asemejan a las montañas plegadas de otras regiones del globo.

14) *Masas eruptivas.*—«La aparición de masas eruptivas detrás de muchas cadenas montañosas de plegamiento sólo es posible si la corteza se desgarró a consecuencia de los estiramientos, y el magma aprovecha las amplias brechas que le facilitan el libre camino a la superficie de la Tierra.» (Haarmann, Lindemann, Schneider.)

La simple rotura facilita la ascensión del magma

comprimido por las fuerzas gigantescas desarrolladas por el despedazamiento y el desplazamiento de los escudos corticales. ¡Todavía el magma apretujado se insinúa en el seno de las capas próximas no alteradas y las abomba alrededor de los lacolitos! Por lo demás, hay fracturas entreabiertas no relacionadas con esfuerzos de tracción. En una región despedazada por la presión los escudos corticales apilados unos sobre otros o inclinados presentan múltiples desgarraduras y hendiduras divergentes, análogamente a como el hielo que se desliza y a la vez sufre presiones se fragmenta en trozos que no guardan entre sí ninguna orientación.

15) *Zonas montañosas*.—«El aspecto zonal de las cadenas es difícil de compaginar con la hipótesis de la contracción. Las diferencias que en la dureza de las rocas existen no bastan para explicar aquél.» (Von Bubnoff.)

La variedad de estructura de los elementos integrantes de las zonas plegadas puede atribuirse no sólo a diferencias de dureza, sino también a diferencias de dirección en los empujes y en los puntos de ataque de los escudos en movimiento. Tales variaciones son de esperar en todas las áreas de plegamiento cuya trayectoria se acomoda a un cambio de dirección (véanse n.º 16 y n.º 20.)

16) *Desplazamiento de bloques*.—«Una tensión cortical producida por la contracción adopta todas las direcciones. Si la disminución del volumen o espacio fuese causa de los plegamientos corticales, las montañas tendrían que rodear, a guisa de anillos cerrados, a los bloques compactos. Esta condición, empero, no se cumple, y menos en los plegamientos antiguos.» (Ampferer.)

Si un geosinclinal que ciñe a un bloque está situado próximamente en sentido normal a la dirección del empuje, se pliega. Si está en la misma dirección en que el esfuerzo actúa, no experimenta ningún arrugamien-

to. Sólo se produce un desplazamiento transversal concomitante con una especie de siega y arrastre. V. Bubnoff concede mucha atención a estos desplazamientos transversales, considerándolos como elemento de importancia orogénica¹. Las regiones de perturbación tectónica no necesitan ser zonas de continuidad persistente, sino que pueden constar de bloques independientes, separados, y sometidos a desplazamientos laterales, los cuales se distinguen también entre sí en cuanto a su carácter tectónico (montañas de plegamiento o montañas de fractura).

Es indudable que la contracción del interior de la Tierra origina tensiones en la corteza que actúan en todos sentidos; su equilibrio o neutralización puede, sin embargo, orientarse en dos direcciones perpendiculares. En el Terciario han tenido lugar plegamientos localizados en dos zonas que se disponen próximamente en ángulo recto (montañas mediterráneas y montañas paefícas).

17) *Número de zonas de plegamiento.*—«Las condiciones de la sedimentación son las mismas en muchos lugares de la corteza terrestre. De ahí que sea inverosímil el que sólo existiese, en un círculo máximo, un lugar débil en el cual fuese posible el equilibrio entre los esfuerzos.» (Amplerer.)

Cierto es que se producen sedimentaciones en muchos lugares de un círculo máximo, pero es muy poco probable que mantengan mutua continuidad en todo su ámbito. La movilidad de los diversos puntos es muy variada, y mientras en un lugar se dan las condiciones favorables para producirse plegamientos, en otros sitios no ha llegado aún el momento de verificarse. La aparición del equilibrio entre los empujes en un determinado punto depende también de la extensión de las zonas dé-

¹ S. v. BUBNOFF, Die Gliederung der Erdrinde, *Fortschr. der Geol. u. Paläont.*, Heft. 3, p. 11. Berlin, 1923.

biles. Si existe una zona corta, o tan sólo una ventana situada en un medio estable, el marco o aureola estable puede transmitir la presión a las zonas débiles alejadas y menos protegidas.

18) *Dirección de los empujes.*—«Cada guirnalda de pliegues, y en correspondencia con sus escudos corticales, tiene un lado interno y un lado externo; pero en relación con los escudos vecinos, los dos lados están trocados, y, por tanto, no pueden distinguirse desde el punto de vista tectónico. En realidad, las cordilleras se componen de una banda de plegamientos externa y de una banda interna sometida a esfuerzos de tracción.» (Amperferer, Haarmann.)

Stille ha hecho notar que la morfología simétrica de los bordes de un geosinclinal plegado es reconocible en casi todas partes. Si una cadena tiene una estructura monoclinial, constituye sólo un borde de la zona plegada; el otro borde, dispuesto simétricamente, puede estar muy alejado (en el geosinclinal mediterráneo abarca toda la anchura de esta cuenca marina; en el geosinclinal pacífico, comprende toda la periferia de la cuenca de este océano).

19) *Emersión de los pliegues.*—«Según la hipótesis de la contracción, las montañas habrían sido plegadas por esfuerzos horizontales. Los plegamientos no guardan, sin embargo, ninguna relación inmediata con la configuración de las montañas.» (Haarmann.)

En virtud de empujes horizontales, los sedimentos de los geosinclinales quedan comprimidos en un espacio reducido, al cual tienen que adaptarse. Como las masas apretujadas allí tienden a recobrar el equilibrio gravitatorio o isostático perturbado, el plegamiento de las mismas está estrechamente ligado con un movimiento ascensional. La masa principal se hunde, se dilata, eleva el borde del bloque compresor y transforma la zona marginal en una meseta (meseta meridional germánica,

Great Basin, buzamiento hacia el E. de las Cordilleras, Tibet). Pero también las masas plegadas ascienden, pues son asimismo empujadas por un ribete de masas más ligeras, que vienen desde lo profundo.

Las masas empujadas en la profundidad sólo se desplazaron hacia un lado, y de ahí que la estructura unilateral de las cadenas plegadas deba atribuirse a que los bloques continentales invadieron los geosinclinales (avance de Eurasia hacia el Sur, de América hacia el Oeste). Otra causa especial no es aceptable. Los escudos del Este de Asia, una de dos: o no han alcanzado la madurez propicia para el plegamiento a que llegó el Oeste americano, o la dirección de los empujes orogénicos era en Asia menos favorable (véase n.º 18), por lo que aquí sólo predominaron las acciones de desgaje o «siega» (fallas, cabalgaduras de unos escudos sobre otros en las guirnaldas montañosas y en las fosas oceánicas).

20) *Particularidades locales de los plegamientos.*— «El origen de las rupturas, inversiones y virgaciones de los pliegues, así como la causa de las diferencias de intensidad en los empujes que se advierten en regiones adyacentes, no pueden ser atribuidos a la simple marcha diferencial de dos grandes escudos.» (Amfferer.)

Ningún geosinclinal está uniformemente constituido. Las zonas de mayor resistencia alternan con zonas débiles. El grado de movilidad de las rocas determina la localización de las particularidades tectónicas. Las regiones más débiles serán las primeras en plegarse, mientras que las más resistentes se fragmentarán. (Stille.) Las ramificaciones, inversiones y virgaciones aparecen cuando los escudos o bloques vuelven a quedar incluidos en guirnaldas de plegamientos.

Los geosinclinales tienen generalmente una trayectoria sinuosa. La dirección según la cual las zonas corticales que ellos ciñen se acometen o enfrentan, sólo en puntos muy localizados está dispuesta normalmente al

eje de los geosinclinales. Si el sentido de los empujes forma con el eje un ángulo agudo, aparecerán también fuerzas desgajantes en el mosaico de bloques del geosinclinal. A causa de estos esfuerzos, muchos escudos o bloques pueden ser alabeados y desplazarse diagonalmente; y entonces desarrollan fuerzas locales que son capaces de rebasar considerablemente la medida normal. Si, por ejemplo, la reducción de los Alpes es superior al empuje conjunto de las montañas de la Península balcánica y del Asia Menor, estamos ante una anomalía, la cual tiene que explicarse pensando que los bloques mediterráneos que forman el fondo del Adriático han desarrollado un empuje muy intenso en su bordo NW., a consecuencia de un viraje y un desplazamiento hacia ese rumbo. Las direcciones anormales de los pliegues, que se observan localmente en los Alpes, obedecen a una perturbación temporal de la dirección desplazatoria de los fragmentos corticales plegantes.

21) *Las capas profundas no plegadas.*—«En muchos lugares las masas plegadas descansan sobre un substratum no perturbado. Esto señala un deslizamiento, y no obedece a un encuentro de los bloques que afecte a las zonas profundas.» (Haarmann, Reyer.)

El fenómeno plegatorio puede ser extraordinariamente rico en matices. Si entre sedimentos tenaces están incluidos otros sedimentos blandos, arcillosos, se producirán, además de pliegues, resbalamientos accidentales. A la reducción sufrida por las capas plegadas del Jura corresponde seguramente una reducción, también espacial, de los estratos infrayacentes en lugares que escapan a la observación.

22) *Corrimientos.*—«En los mantos alpinos aparecen transportes de masas de extraordinaria amplitud. Sólo una fuerza que actúe superficialmente, y no la contracción, sería capaz de realizar ese trabajo.» (Haarmann, Holmes, Schneider.)

La dificultad de explicarse los grandes mantos de corrimiento de los Alpes no contradice a la hipótesis de la contracción más que a las otras hipótesis. Quizá el nombre de «corrimiento» no haya dado a los intentos de interpretación, ya desde un principio, un sentido completamente claro. Cabe pensar que no se haya producido ningún empuje, o casi ninguno, y que las cobijaduras sean trozos de corteza que, embutidos o cogidos entre otros fragmentos, hayan permanecido fijos en su lugar, mientras debajo de ellos los sedimentos más profundos y, por tanto, más plásticos, hayan sido empujados y arrugados, o hayan quedado desgajados en gran parte de las rocas profundas de que proceden. La fricción con la superficie profunda no fué, por consiguiente, relativamente grande, toda vez que el trabajo inherente a aquélla se habría traducido en calor, si bien este calor habría disminuido considerablemente el grado de viscosidad en las capas limitantes, y la superficie de fricción se habría transformado en una superficie de deslizamiento.

23) *Oscilaciones* (Epirogénesis).—«En muchas regiones de la Tierra los movimientos de elevación han alternado con los de hundimiento. Estas oscilaciones han ido acompañadas circunstancialmente de cambios en sentido transversal (p. ej., en la Rusia europea). Pero las ondulaciones producidas en una determinada dirección no varían aun cuando los empujes las acentúen o las moderen.» (Haarmann.)

Estos hechos pueden reducirse a una repetida alternancia de dirección y de intensidad de los esfuerzos horizontales. Lo demuestra una placa de hierro que esté colocada en un marco cuyos listones opuestos son susceptibles de ser mutuamente acercados, apretando. Las variaciones de tensión en una o en otra dirección se traducen en la placa con las más variadas abolladuras. Igualmente la corteza responde a los impulsos variados

que acarrea una contracción del interior del globo, según las direcciones más diversas.

Creemos no haber olvidado ninguna objeción a la hipótesis de la contracción que presente apariencias de tal, y que todas han sido contrarrestadas con fundamentos suficientes. El ser esto posible ya constituye de por sí un argumento muy eficaz en favor suyo. Sin embargo, siempre quedan algunas oscuridades que alambrazar; pero son de poca importancia si se las compara con la muchedumbre de enigmas insolubles que suscita cada una de las otras hipótesis. Mas todo el valor de la hipótesis de la contracción se destaca en cuanto con su auxilio llegamos a descubrir la conexión que existe en los hechos geológico-tectónicos (véase § 28). Por esto Kober se abstiene de recetar o prescribir una hipótesis, pues en cada una hay algo de realidad; y esta advertencia se funda tanto en que el alcance de las aplicaciones de la hipótesis es limitado como en la existencia de hechos que no son congruentes con ella. Pero si se ha logrado desarrollar una hipótesis cuyo objeto y cuyos resultados se coordinan con un nexo causal de conjunto, con los postulados de otras ciencias (la Física, la Química, la Geofísica), y que está contrastada con hechos de observación astronómica, el escepticismo no está justificado. Una tal «hipótesis universal» no es una doctrina, un mero sistema; es ya una realidad que se contempla en el conjunto armonioso y lógicamente cimentado.

§ 30

Conclusión

Las hipótesis geotectónicas constituyen el esfuerzo encaminado a determinar los factores determinantes de la estructura tectónica de la Tierra y de las alternativas regulares de Orogénesis y Epirogénesis. Estas teorías

resuelven el problema de diversos modos. Algunas sólo lo hacen de una manera sumaria. Otras procuran esclarecer también las particularidades del proceso evolutivo. Puesto que la observación directa queda reducida a la actualidad geológica, y el grado de veracidad de las hipótesis no es demostrable con su propio objeto de estudio, no queda otro camino que el de la comprobación indirecta, y de una manera alternativa. Primero puede plantearse la cuestión de si los hechos de observación cuyo esclarecimiento se intenta se aducen de una manera no violenta, o si presentan contradicciones; y en segundo lugar, si las actividades que se invocan pueden situarse en el terreno de las probabilidades y son medibles cuantitativamente para alcanzar el efecto exigido.

Hasta ahora, casi sólo se ha seguido el primer camino. Varios investigadores han dirigido sus trabajos expresamente por la segunda trayectoria. Pero esta valoración crítica no queda sin justificación. Si incluso hubiera de concederse que la insuficiencia de una hipótesis es notoria tan pronto como se encuentran contradicciones entre ella y los hechos de observación, no es posible, empero, pretender que a causa de este aspecto puramente negativo no se pueda admitir en la hipótesis ningún fundamento seguro. El segundo camino tiene sobre el primero la ventaja de que por anticipado da a la hipótesis un valor positivo. Una demostración cuantitativa permite distinguir las simples conjeturas de lo que son ideas autorizadas. No necesita ser corregida¹, y sólo pue-

¹ Es indiscutible que también la comprobación numérica no conduce siempre a resultados del todo exactos, sino que a menudo sólo da valores aproximados, toda vez que las constantes que intervienen en el cálculo no son de una seguridad indubitable. Pero quien sobre estos fundamentos quisiera edificar juicios dudosos y consecuencias fantásticas, socavaría los cimientos de la ciencia. Lo que constituye el valor del conocimiento científico debe diferenciarse de lo fantástico. Cuando el

de perder su capacidad demostrativa si varían los fundamentos sobre los cuales descansa. En este caso no se trata de las hipótesis antiguas, sino de una hipótesis nueva, la cual a su vez exige una comprobación. Por esto en los precedentes párrafos hemos concedido, sin ocuparnos de demostraciones empíricas, un especial valor a la demostración cuantitativa. Y por esto también hemos llegado a la importante conclusión de que entre todas las hipótesis sólo la de la contracción tiene comprobación. Tiene la ventaja de responder, no sólo al conjunto, sino a todos los detalles.

El valor de la verosimilitud de una hipótesis aumenta cuando se dilata el campo de sus aplicaciones. Cierto es que la investigación geotectónica no está en el esplendor que la física y la química, las cuales llegan a los resultados mediante la inducción; pero hay un objeto de comparación, el cual, aunque sólo a título de ejemplo opuesto, da explicaciones llenas de enseñanzas: la Luna. Ya hemos dicho repetidas veces que la faz de la Luna no presenta ninguna semejanza con la de la Tierra. Para la Tierra son características las cordilleras pequeñas, longitudinalmente tendidas; para la Luna los cráteres típicos, casi circulares. En la Luna faltan por completo las cadenas montañosas. Lo que se designa con el nombre de montañas (Apeninos, Alpes, Cárpatos, Cáucaso), son tan sólo los escarpados bordes de zonas extensas más bajas. Por el contrario, faltan en la Tierra formas que pudieran compararse con los cráteres lunares. Los volcanes terrestres guardan con los de la Luna una semejanza muy lejana. La mayoría de los volcanes terrestres son montañas de altura notable, en cuya cúspide está excavado un pequeño cráter de algunos centenares de metros de diá-

mismo valor se concede a lo uno que a lo otro, la ciencia ya no es ciencia, sino *instabilis tellus, instabilis nuda* (véanse los instructivos juicios de M. Semper en el artículo «Was ist eine Arbeitshypothese?», *Zentrbl. f. Mineralogie*, 1917, p. 146.)

metro. Los cráteres lunares son, en cambio, zonas profundas de la superficie del satélite rodeadas de murallas, y tienen de uno a un centenar de kilómetros de diámetro.

Si se plantea el problema acerca de cuáles son las fuerzas originarias de los cráteres lunares, externas o internas, también se percibe alguna luz para el problema geotectónico. Se ha conjeturado que los cráteres son producto de la actividad volcánica. F. E. Suess¹ les atribuye actividad magnética, si bien de distinta naturaleza que la de los volcanes terrestres. Los considera como mares de lava solidificados. Esta explicación exigiría que las murallas que rodean a los volcanes fuesen uniformes. La realidad es que están interrumpidas por profundas entalladuras; algunas cumbres suben hasta el doble de la altitud general. Además, la distribución regular de los cráteres, en contraste marcado con la estrecha sujeción que los volcanes terrestres muestran a pequeñas zonas, demuestra que la estructura tectónica de la corteza lunar no ha influido para nada en aquéllos. Tampoco el gigantesco tamaño de tales volcanes es compatible con la opinión de que sean fenómenos realmente volcánicos². Puesto que los cráteres están hundidos en la superficie lunar, se ha emitido por otros autores la idea de que son semejantes a los *maare* del Rifel; cráteres de

¹ NEUMAYR-SUESS, *Erdgeschichte*. 3.^a edición, Leipzig, 1920.

² Sólo los Mares lunares parecen ser producto de actividades endógenas. Es muy probable que se trate de gigantescas efusiones a través de grandes fracturas, las cuales se originaron por efecto del agrandamiento de la órbita lunar como consecuencia de haber adquirido la Luna su configuración esférica. Puesto que los cráteres sumergidos han sido destruidos en su mayor parte, los mares lunares presentan pocos cráteres relativamente.—El cráter Wargentín, lleno hasta casi el borde, muestra que en la formación del cráter intervienen circunstancialmente reacciones endógenas que modifican algo el proceso del fenómeno. FR. NÖLKE, Acerca del origen de las formas superficiales de la Luna. *Astron. Nachr.*, t. 215, Nr. 5145, 1922.

explosión. También es afín la opinión de que ¹ hayan sido producidos por intumescencias de grandes burbujas de la corteza lunar. Si fuese cierto, habría que suponer que las gigantescas masas de gases expulsados a modo de atmósfera lunar han influido en el relieve superficial del satélite, de una manera análoga a como lo ha hecho la atmósfera terrestre en el relieve del planeta. Pero no existe el menor rastro de aguas en movimiento ni del viento originado por la insolación, con las subsiguientes acciones erosivas. Las murallas de los cráteres lunares se yerguen enhiestas, y allí donde están destruidas no lo han sido por acciones atmosféricas, sino en virtud de nuevos cráteres aparecidos ². A consecuencia de la emisión de los gases, la Luna habría disminuido notablemente de volumen. Por tanto, si los gases primitivos fueron también absorbidos u ocluidos por la masa interna de la Luna, y sólo ocuparon un pequeño volumen, debieron ocupar en estado libre, antes de ser expulsados, un considerable espacio en el interior de la Luna, el cual, después de huir ellos al exterior, no podía permanecer a modo de cavidades, sino que sería rellenado por el material de las paredes; es decir, *la Luna se habría tenido que arrugar notablemente a consecuencia de la liberación de los gases*. Pero con esta conclusión están en desacuerdo las deducciones tectónicas. No aparecen por ninguna parte cadenas montañosas plegadas; sólo se observa la existen-

¹ Especialmente por F. Sacco (*Handwörterbuch der Naturwissenschaften*, Abschnitt Selenologie, Jena, 1913).

También E. Kayser considera los cráteres como fenómenos explosivos de intumescencia o eyección. (*Lahrbuch der Geologie*, t. I, 5.^a edición, p. 690.) C. Mordziol considera las paredes de los cráteres como masas levantadas isostáticamente (véase § 16).

² Que pudieran existir restos de la atmósfera lunar primitiva se deduce considerando que no sólo Marte, cuyo tamaño es intermedio al de la Luna y de la Tierra (masa, 1/9 de la masa terrestre), presenta todavía atmósfera, sino también el pequeño Mercurio, según demuestra el espectro (masa, 1/18 de la terrestre + 1/2 de la masa de la Luna).

cia de algunos desplazamientos en la vertical, y algunos escudos. De esto puede inferirse que la Luna no ha experimentado ningún arrugamiento evidente; y de la semejanza de su faz con la de la Tierra se deduce además que los dos cuerpos celestes han seguido evoluciones distintas.

A las mismas conclusiones llega G. H. Darwin en sus trabajos. Este retrotrae el desarrollo de la Luna hasta el momento en que distaba menos de la Tierra mientras giraba alrededor de ésta. Su distancia era entonces de 2 veces el radio terrestre, y su período de rotación en derredor del globo terráqueo era de 4 horas. Acerca de los fenómenos que estos hechos trajeran consigo, sólo formula suposiciones (véase § 17). Más verosimilitud puede extraerse de las conclusiones de Darwin al considerarlas desde otro punto de vista (véase § 26). La atmósfera terrestre estaba altamente calentada, así como los productos procedentes de los gases más fácilmente condensables, los cuales en general descendían hacia la superficie, y una vez en las capas inferiores de la atmósfera se vaporizaban nuevamente. Pero la atmósfera terrestre se dilató a causa de su elevada temperatura, hasta más allá de un límite donde una pequeña porción hizo libre, rodeó a la Tierra y giró al mismo tiempo que ésta¹; en su virtud, los productos de condensación conservaron su estructura y naturaleza, aumentaron sus masas al cristalizar nuevas substancias, y crecieron en forma de pequeñas lunas, hasta que éstas, finalmente, a causa de la acción atractiva particular y la resistencia de las masas atmosféricas circundantes, fueron reuniéndose en una sola luna. Las materias más fácilmente condensables, como la sílice, la alúmina y el óxido de calcio, debieron ser las primeras en separarse de la at-

¹ En este caso, la atmósfera no giraba uniformemente, sino a manera de un torbellino, más rápidamente las capas internas que las externas. Véase § 26, apartado d.

mósfera en forma flúida. Constituyen la parte principal de las rocas siálicas y simáticas del manto terráqueo. Si la Luna se ha formado a expensas de productos de condensación de la atmósfera terrestre, queda patente la circunstancia de presentar el satélite de la Tierra una masa de carácter absolutamente pétreo. Coincide con esta conclusión el hecho de que la densidad de la Luna es 3.4, es decir, la misma que la de la litosfera terrestre.

Si la Luna ha atravesado este proceso evolutivo, *fué desde el comienzo un cuerpo flúido o sólido de constitución homogénea*. En este caso no actuaban en su seno fuerzas de carácter físico ni químico con una intensidad capaz de poder producir una «movilización de la materia» del interior, como aconteció en el globo terráqueo. Aunque a consecuencia de los fenómenos radiactivos se produjese calor capaz de fundir la masa de la Luna, no se originaría ninguna corriente de convección, pues las substancias no tendrían diferencias de pesantez tan acusadas como para que, al quedar diferenciadas por la fluidificación, se estratificasen por su orden relativo, ni tampoco fueron factibles otras combinaciones químicas que las preexistentes. Por esto la Luna tiene una débil capacidad de contracción, la cual quedaría circunscrita a las resultancias de la pérdida de calor por irradiación; la consecuencia de esto ha sido que no pudiese formarse ninguna cadena de plegamiento, sino tan sólo imperceptibles arrugas de algunos metros de altura. A causa de la casi total ausencia de gases en el interior de la Luna, no pudieron producirse tampoco cráteres de explosión; con toda verosimilitud los cráteres lunares son las huellas de la emisión de cuerpos lunares pequeños, los cuales, al final, pero antes de abandonar la atmósfera terrestre, se integraron a nuestro satélite ¹.

La Tierra y los restantes planetas son hermanos del

¹ A. WEGENER, *El origen de los cráteres lunares*. Sammlang Vieweg, H. 55.—Fr. NÖLKE, *Astr. Nachr.*, t. 215, Nr. 5.145. 1922.

Sol, y con éste, porciones de la nebulosa primitiva ; pero la Luna no es un hermano, sino un hijo de la Tierra, y por cierto un hijo que en nada se parece a la madre, puesto que ésta no dió de lleno su sustancia para formar el hijo, sino una poca, la que en su atmósfera ardiente pasó con mayor rapidez del estado gaseoso al líquido. La Tierra, todavía en embrión, pudo contraerse en los estadios evolutivos posteriores hasta llegar a los tiempos geológicos actuales y, por consiguiente, originar plegamientos montañosos y elevarse y hundirse los continentes. Pero al mismo tiempo, la Luna, indolente, adoptó una faz de piedra, que no habla de ser modificada por los acontecimientos posteriores.

La Tierra y la Luna han seguido desarrollos distintos, y no pueden ser comparadas. Pero una y otra están incluídas en la gran unidad de plan de la evolución cósmica, encuadrada en la hipótesis nebular.

**BIBLIOGRAFIA RELACIONADA CON LA
OBRA «HIPOTESIS GEOTECTONICAS»,
DE FR. NOELKE**

Biblioteca de estudios geofísicos, publicada bajo la dirección del profesor Dr. CARL MAINKA, Ratibor (Silesia Alta). Editores: Gebrüder Borntraeger, Berlin y Leipzig.

- Quaderno 1. *Física de las ondas sísmicas*, por el prof. doctor C. Mainka. Con 35 figuras en el texto y 20 tablas (VIII y 156 págs.), 1923.
- » 2. *Hipótesis Geotectónicas*, por el prof. Fr. Nölke. Bremen (VIII y 123 pp.), 1924. En rústica, 4,80 RM.
- » 3. *Sacudidas sísmicas*, por el prof. Dr. B. Gutenberg. Darmstadt. Con 8 figuras en el texto (X y 68 pp.). En rústica, 4,20 RM. 1924.
- » 4. *Los métodos de observación de los meteorólogos modernos*, por el prof. Dr. Robitzsch, Lindenberg. Con 25 figuras (V y 125 pp.), 1925. En rústica, 3,75 RM.
- » 5. *El problema de la periodicidad de los terremotos*, por el prof. Ernest Tams, Hamburgo. Con 15 figuras y 49 cuadros en el texto. (X y 128 pp.), 1926. Idem, id., 9,60 RM.
- » 6. *Análisis de los fenómenos periódicos*. Bosquejo de Periodigrafía con especial consideración de los modernos métodos, por el Dr. Carl Stumpff, Breslau. Con 41 figuras en el texto y 14 cuadros, y una lámina (X y 188 pp.), 1927. Idem, idem, 14,40 RM.
- » 7. *Los procedimientos magnéticos en Geofísica*, por

- el Dr. Huns Haalek. Con 61 figuras y 8 tablas (VIII y 150 pp.), 1927. Idem, id., 12 RM.
- Cuaderno 8. *Prospección eléctrica del suelo*, con los fundamentos físicos y su aplicación práctica, por el doctor Walther Heine. Con 117 figuras (VIII y 222 pp.). 1928. Idem, id., 18 RM.
- » 9. *Introducción a la electricidad atmosférica*, por el Dr. K. Kähler. Con 16 figuras (VIII y 244 pp.), 1929. Idem, id., 17,60 RM.
- » 10. *Los procedimientos gravimétricos en Geofísica*, por el Dr. H. Haalek. Con 85 figuras (VIII y 205 pp.), 1929. Idem, id., 16,80 RM.

Tratado de Geofísica, por numerosos colaboradores, bajo la dirección del prof. Dr. B. GUTENBERG.

S u m a r i o

Tomo 1.—LA TIERRA COMO PLANETA :

- Cuaderno 1. *Introducción*, por el prof. Dr. B. Gutenberg. *Evolución del sistema solar y de la Tierra*, por el prof. Fr. Nölke. *Situación y movimientos de la Tierra en el Universo*, por el prof. Dr. Milankovitch. *Figura de la Tierra, rigidez y presión en el interior del globo*, por el consejero doctor P. Hopfner (VII y 308 pp.), 1931. En rústica: 43,20 RM. Para suscriptores a toda la obra, 36 RM.
- » 2. *Mareas*, por el prof. Dr. Bartels. *Las mareas de la corteza sólida*, por el consejero Dr. Hopfner. *Movimientos de torsión de la Tierra*, por el profesor Dr. Milankowitch. *Migraciones seculares de los polos*, por el prof. Dr. Milankowitch. Con 85 figuras (191 pp.), 1933. Precios en rústica: 28,80 RM. y 24 RM.
- » 3. *Fluctuaciones de la latitud*, por el prof. Dr. Lambert. *Teoría de la gravedad*, por el Dr. Ansel. *Observaciones de la gravedad. Variaciones de la vertical. Isostasia*, por el prof. Dr. Heiskanen. En preparación.

Tomo 2.—ESTRUCTURA DE LA TIERRA :

- Cuaderno 1. *Enfriamiento y temperatura de la Tierra*, por el

prof. Dr. B. Gutenberg. *Química de la Tierra*, por el prof. Dr. Berg. *Edad de la Tierra. Antigüedad geológica*, por el prof. A. Born. *Estructura física de la Tierra*, por el prof. B. Gutenberg. Con 183 figs. (504 pp.), 1931. Precios en rústica: 81,00 y 68 RM.

- Cuaderno 2. *Estructura geológica de la Tierra*, por el prof. doctor Born. Con 221 figs. (303 pp.), 1932. Precios: 55,20 y 46 RM.
- » 3. *La superficie terrestre*, por el Dr. Kossinna. *Estructura petrográfica de la corteza terrestre*, por el Dr. Rösch. *Química de los meteoritos*, por el prof. von Hayesy. Con 62 figs. (XVI y 237 pp.), 1933. Precios: 53,00 y 26 RM.

Tomo 3.—MODIFICACIONES DE LA CORTEZA TERRESTRE:

- Cuaderno 1. *Caracteres de las zonas*, por el prof. Dr. Reich. *Los métodos de investigación eléctrica*, por el doctor H. Hunkel. *Teoría de los métodos de investigación gravimétrica*, por el prof. Dr. Ansel. *Instrumentos de los métodos gravimétricos* (primera parte), por el Dr. Meisser, de Jena. Con 134 figs. (312 pp.), 1931. Precios: 50,40 y 42 RM.
- » 2. *Sumario de esta parte*, por el Dr. Meisser. *Práctica de los métodos gravimétricos*, por el prof. doctor Heiland. *Medida de las sacudidas*, por el profesor Reutlinger. *Métodos sísmicos*, por el doctor Meisser. En preparación.
- » 3. Comprenderá: *Métodos magnéticos*, por el profesor Dr. Heiland. *Otros métodos*, por el doctor Heiland. *Valoración de los métodos*, por el doctor Reich.

Tomo 4.—TERREMOTOS:

- Cuaderno 1. *Teoría de las ondas sísmicas. Observaciones. Inestabilidad del suelo*, por el prof. Dr. B. Gutenberg. Con 146 figs. (298 pp.), 1929. Precios: 26,40 y 22 RM.
- » 2. *Sismómetros. Valoración de los diagramas*, por el

Dr. Berlago. *Geología de los terremotos*, por el consejero prof. Dr. Sieberg. Con 255 figuras (387 pp.), 1930. Precios : 36 y 40 RM.

Cuaderno 3. *Geografía de los terremotos*, por el consejero profesor Dr. Sieberg, con 113 figs. (1V y 319 pp.), 1932. Precios : 67,20 y 56 RM.

- » 4. *La sucesión periódica de los sismos y las causas que los producen*, por el prof. Dr. Konrad. Con 49 figs. (XII y 179 pp.), 1932. Precios : 31,20 y 26 RM.

Tomo 5.—ACTIVIDADES MAGNETICAS Y ELECTRICAS :

Magnetismo terrestre, por el prof. Dr. Bartols
Corrientes telúricas y luz polar, por el prof. doctor Krogness. *Electricidad atmosférica. Radiaciones superiores*, por el prof. Beaudorf y profesor Dr. Hess, de Innsbruck.

Tomo 6.—METODOS GEOFISICOS :

Cuaderno 1. *Actividades de la corteza terrestre*, por el profesor B. Gutenberg. *Plutonismo y Vulcanismo*, por el prof. Dr. F. v. Wolff. *Movimientos de la corteza*, por el prof. A. Born. *Hipótesis geotectónicas*, por el prof. B. Gutenberg. *Acciones mecánicas del hielo sobre la corteza*, por el profesor Dr. Hess, de Nuremberg. Con 207 figuras (570 pp.), 1930. Precios : 57,60 y 48 RM.

- » 2. *Mecánica de la Atmósfera, Predicción del tiempo*, por el prof. Dr. Stüve. En prensa.
» 3. *Fenómenos periódicos en la atmósfera, incluso las mareas*, por el prof. Dr. Weickmann. *Clima, variaciones del clima*, por el prof. doctor Konrad. *Microclima, temperatura del suelo*, por el Dr. Geiger. En preparación.

Tomo 7.—FISICA DE LA HIDROSFERA :

Cuaderno 1. *El hielo en la Tierra*, por el prof. Dr. Hess, de Nuremberg. *Lagos*, por el prof. Dr. Halbfass. *El agua subterránea*, por el prof. Dr. Koelma. Con 54 figs. (252 pp.), 1933. Precio : 33,60 y 28 RM.

- » 2. *Comprenderá : Física de los ríos*, por el Dr. Ing. P. Nemeny. *Métodos e instrumentos oceanográ-*

ficos, por el Dr. Wüst. *Resultados, Mareas, Mareus lacustres*, por el prof. Dr. Defant.

Tomo 8.—FISICA DE LA ATMOSFERA, I:

Comprenderá: *Métodos de observación aerológica*, por el Dr. Duckert. *Temperatura y radiación de los astros*, por el prof. Dr. Milaukovitch. *Optica meteorológica*, por el prof. Dr. Mayer, de Riga. *Rasgos de los crepúsculos*, por el prof. Dr. Gruner. *Teorías de la reflexión difusa y de la polarización*, por el Dr. Auna Schizmann. *Instrumentos de medida y extinción de las radiaciones*, por el prof. Dr. Linke. *Ozono*, por el doctor Götz.

Tomo 9.—FISICA DE LA ATMOSFERA, II:

- Cuaderno 1. *Estructura de la Atmósfera. Propagación del sonido*, por el prof. Dr. B. Gutenberg. *Capacidad calorífica de la Estratosfera*, por el prof. doctor Tichanowski, †. *Estudios complementarios*, por el Dr. Mügge. Precios: 28,80 y 24 RM.
- » 2. *Acciones mecánicas del agua y el viento. Dunas*, por el prof. Dr. Solger. *Conocimiento de los suelos, descomposición*, por el consejero profesor Dr. Kaiser. En preparación.

Tomo 10.—TEMAS VARIOS:

Comprende: *Influencia de los fenómenos geofísicos en la vida*, por el prof. Dr. Löwy y doctor Götz. *Presunción y realidad de las periodicidades. Correlaciones, métodos de cálculo*, por el prof. Dr. Pollack. *Métodos estadísticos, funciones, fórmulas, unidades, tablas*, por el profesor Dr. Bartels. *Métodos generales de observación geofísica: generalidades acerca de medidas, instrumental, aparatos registradores, de amplificación, fotográficos, horarios, señales del tiempo*, por el consejero prof. Dr. Hecker, Dr. Meisser y Dr. Martin.

Tratado de Geofísica, con la colaboración de varios autores, bajo la dirección del prof. Dr. B. GUTENBERG. Con 412 figuras y 2 láminas (XX y 1.017 pp.), 1929. Encuadernado, 80 RM.

Tratado de Geofísica aplicada, métodos de investigación geofísica, por el prof. Dr. H. HAALCK. Con numerosas ilustraciones. Encuadernado, 26 RM.

Principios fundamentales de Geodesia, por el profesor Dr. GEORG WEGEMANN, con 23 figuras (184 pp.), 1926. Encuadernado, 6,60 RM.

Fundamentos de Sismología, por el prof. Dr. B. GUTENBERG, con 84 figs. y 1 lámina (189 pp.), 1927. Encuadernado, 6,60 RM.

La electricidad de las tempestades, por el Dr. K. KAELLER, con 9 figuras (148 pp.). Encuadernado, 4,50 RM.

Rasgos fundamentales de la atmósfera y medida de la figura terrestre, por el Dr. H. SARNETZKY, con 117 figuras y 4 tablas numéricas. Encuadernado, 12 RM.

Investigaciones sobre la electricidad atmosférica mediante globos-sonda, por A. WIGAND. Con 11 figuras (52 pp.), 1925. En rústica, 5,40 RM.

La casa Gebrüder Borntraeger facilita prospectos gratis.

Índice alfabético de autores citados

- Adams, Fr. D., 89 y 130.
 Ampferer, O., 37, 78, 79, 82,
 165, 171, 172, 179, 180, 181
 y 182.
 Andréé, K., 73, 78, 80, 90,
 165, 171 y 172.
 Ansel, 194 y 195.
 Argand, 175.
 Arldt, Th., 109.
 Arrhenius, Sr., 53.
 Bartels, 194, 196 y 197.
 Baschin, O., 113 y 115.
 Beaumont, E. de, 18 y 87.
 Bemmelen, R. W. v., 72.
 Bennndorf, 196.
 Berlage, 196.
 Berg, 195.
 Blytt, A., 115.
 Böhm, A., 66, 102, 104, 115
 y 116.
 Born, A., 33, 150, 151, 153,
 156, 157, 161, 165, 172, 195
 y 196.
 Borne, G. von dem, 80 y 90.
 Boyle, 92.
 Buch, L. von, 16 y 87.
 Burmeister, F., 124.
 Bubnoff, S. von, 165, 174,
 179 y 180.
 Chamberlin, Th. C., 56, 62
 y 147.
 Cloos, H., 89, 160 y 162.
 Croll, J., 53.
 Cuvier, G., 17.
 Daqué, E., 45, 49, 73, 75
 y 151.
 Daly, R. A., 162.
 Dana, J., 18 y 29.
 Darwin, Ch., 154.
 Darwin, G. H., 97, 98, 100,
 102, 108, 168 y 190.
 Deerke, W., 25.
 Defant, 197.
 Descartes, R., 18.
 Diener, C., 128.
 Duckert, 197.
 Dutton, C. E., 78, 81, 165,
 166 y 172.
 Emden, R., 58.
 Eddington, 134.
 Epstein, P., 105, 107 y 120.
 Faye, H., 56.
 Geiger, 196.
 Gerth, H., 88.
 Goethe, W. von, 16.
 Goldschmidt, V. M., 143.
 Götz, 197.
 Gruner, 197.
 Gutenberg, B., 129, 145, 193,
 194, 196 y 197.
 Haalck, H., 194 y 198.
 Haarmann, E., 71, 92, 165,
 171, 177, 178, 181, 183, 184.
 Halbfass, 196.
 Haug, E., 32.
 Hecker, 197.
 Heim, Alb., 75 y 175.
 Heiland, 195.
 Heine, W., 194.
 Heiskanen, 194.
 Helmert, R., 27.
 Hennig, E., 126.

- Hess, 196.
 Hevesy, 195.
 Holmes, A., 82, 144, 145,
 165, 175 y 183.
 Hopfner, P., 194.
 Horn, E., 163.
 Humboldt, A. von, 16 y 87.
 Hunkel, H., 195.
 Hutton, J., 16.
 Jacobi, 99.
 Jawoski, E., 128.
 Jeans, I. H., 56 y 62.
 Jeffreys, H., 39, 62, 101, 102,
 132, 145, 165 y 168.
 Joly, J., 74, 93, 94, 95 y 145.
 Kähler, K., 194 y 198.
 Kant, J., 56.
 Karpinsky, A., 153.
 Kayser, E., 70, 76, 88, 89,
 189 y 197.
 Kelvin, Lord, 48.
 Kepler, 139.
 Kingsley, J., 68.
 Kircher, A., 15.
 Klute, F., 59.
 Kober, 158 y 185.
 Koelme, 196.
 Köppen, W., 44, 105, 112,
 113 y 127.
 Kossina, 195.
 Kossmat, F., 37, 49, 128,
 158, 164 y 175.
 Kraus, E., 86.
 Kreichgauer, D., 37, 45, 66,
 111, 112 y 123.
 Krenkel, E., 163.
 Konrad, 196.
 Krogness, 196.
 Lachmann, R., 75.
 Lambert, 194.
 Laplace, P. S., 56, 60, 61
 y 62.
 Lepsius, R., 49.
 Ligondès, R. de, 56.
 Lindemann, B., 165, 166,
 170 y 178.
 Linke, 197.
 Lotze, Fr., 94.
 Loukasczewitz, 172.
 Löwy, 197.
 Lozinski, W. von, 89 y 90.
 Lyell, Ch., 17.
 Maclaurin, 99.
 Mainka, C., 18, 80 y 193.
 Mariotte, 92.
 Martin, 197.
 Maxwell, 135.
 Meisser, 195 y 197.
 Meinardus, W., 52.
 Meyer, 197.
 Milankovitch, M., 53, 54, 55,
 194 y 197.
 Molengraff, G., 154.
 Mordziol, C., 95, 97 y 189.
 Mügge, 197.
 Meyermann, B., 131, 132
 y 133.
 Nemeny, P., 196.
 Neumayr, M., 73 y 188.
 Nölke, Fr., 37, 44, 52, 53, 54,
 56, 99, 105, 109, 119, 120,
 132, 134, 165, 176, 188,
 191, 193 y 194.
 Obrutschew, W. A., 49.
 Olbricht, K., 49.
 Oseki, K., 49.
 Penck, A., 67 y 128.
 Penck, W., 87, 88, 89, 90
 y 128.
 Perlewitz, P., 164.
 Pickering, W., 66, 97, 98, 99
 y 102.
 Playfair, J., 16.
 Pockels, Fr., 102.
 Poincaré, 99.
 Pollack, 197.
 Pratt, A., 25.
 Prey, A., 18 y 80.
 Quiring, H., 104, 165 y 166.

- Read, M., 73, 76, 77, 80
 y 90.
 Reich, 195.
 Reyer, E., 66, 67, 70, 165,
 171 y 183.
 Reutlinger, 195.
 Richthofen, F. von, 73, 79
 y 155.
 Robitzsch, 193.
 Rösch, 195.
 Rothpletz, A., 90 y 91.
 Rudzki, M. P., 48, 165, 168
 y 171.
 Sacco, F., 189.
 Salomon-Calvi, W., 32, 59,
 175 y 176.
 Sandberg, C. G. S., 87, 91
 y 165.
 Sarnetzky, H., 198.
 Schardt, H., 67.
 Schiaparelli, J., 44.
 Schiller, W., 129.
 Schizmann, A., 197.
 Schneider, K., 110, 165, 166,
 171, 178 y 183.
 Schwarzschild, K., 58.
 Schweydar, W., 26, 35, 38
 y 122.
 Schwinner, R., 82.
 Seidlitz, W. von, 32.
 Semper, M., 187.
 Senger, M., 128.
 Shapley, H., 54.
 Sieberg, A., 196.
 Simroth, H., 40, 44, 66, 108,
 109, 110 y 119.
 Soergel, W., 128.
 Solger, 197.
 Sonder, R., 68, 147 y 149.
 Steno, N., 15.
 Staub, 175.
 Stille, H., 30, 32, 33, 126,
 148, 151, 156, 157, 158,
 160, 172, 178 y 182.
 Stumpff, C., 193.
 Stüve, 196.
 Suess, E., 18, 25, 163 y 173.
 Suess, F. E., 188.
 Tait, 51.
 Tammann, G., 79 y 80.
 Tams, E., 18, 80 y 193.
 Thomson. (Véase Lord Kel-
 vin.), 51.
 Tichanowski, 197.
 Toit, A. L. du, 129.
 Ulrich, E., 32.
 Wanach, B., 47.
 Wegemann, 198.
 Wegener, A., 36, 40, 44, 45,
 47, 49, 66, 82, 105, 107,
 108, 112, 113, 117, 119, 120,
 122, 125, 128, 156, 165,
 166, 172, 173, 175 y 191.
 Weickmann, 196.
 Wepfer, 46 y 172.
 Werner, A., 16.
 Wiechert, E., 35.
 Wigand, A., 198.
 Wolf, F. V., 196.
 Wüst, 197.
 Yokoyama, M., 49.

VOCABULARIO

A

Accesos febriles, 32 y 33.
 Actualismo, 17.
 Adriático, 183.
 Africa, 118, 124, 125, 126,
 176 y 178.
 Africa Central, 30, 34, 149
 y 163.
 Alb, 36.
 Alemania, 156.
 Alpes, 27, 31, 49, 68, 75, 77,
 86, 88, 152, 155, 158, 183
 y 187.
 América, 118, 124 y 182.
 América del Norte, 94.
 América del Sur, 125 y 126.
 Andes, 89.
 Andes argentinos, 88.
 Anisostático, 123.
 Anorogénesis, 17.
 Antártida, 34 y 176.
 Antartis, 52 y 118.
 Apalaches, 89.
 Apeninos, 155 y 187.
 Arabia, 149 y 163.
 Asia, 50, 94, 119 y 182.
 Asia Menor, 183.
 Atlántico, 34, 94, 95, 120,
 124 y 141.
 Australia, 118 y 176.

B

Batolito, 162.
 Baviera, 151.
 Behring (estrecho de), 125.

Betelgeuze, 59 y 60.
 Botnia (golfo de), 28.
 Bouvet (isla), 125.
 Brasil, 30 y 149.

C

Cabo Verde (islas de), 126.
 Calentamiento de la Tie-
 rra, 168.
 California, 155.
 Canarias, 126.
 Carbonífero, 175.
 Cárpatos, 89, 155 y 187.
 Cáucaso, 88 y 187.
 China, 49.
 Círculo de oscilación, 108.
 Cohesión de la Tierra, 170.
 Continentes, 23, 24, 28, 93,
 105, 117 y 140.
 Carrimientos, 183.
 Corteza terrestre, 147 y 171.
 Cráteres lunares, 187, 188
 y 191.
 Cretácico, 126.
 Criptovolcánico, 35 y 36.
 Cristalocinético, 75.
 Cuaternario, 118.
 Cuenca Pacífica, 102.

D

Deriva continental, 175.
 Desplazamiento cortical, 111
 y 174.
 Desplazamiento de bloques,
 179.

Diastrofismo, 68.
 Diástrofos, 32.
 Dinámica endógena, 18.

E

Eifel, 188.
 Elipsoide de Jacobi, 99.
 Elipsoide de Maclaurin, 99.
 Enfriamiento de la Tierra, 166.
 Eoceno, 126.
 Epeiroforesis, 175.
 Epirogénesis, 32, 148, 184 y 185.
 Epirogénico, 79 y 82.
 Escandinavia, 30, 118, 149 y 176.
 Escudos continentales, 105, 118 y 140.
 Escudo cortical, 115.
 Eurasia, 182.
 Europa, 29, 94, 124 y 126.

F

Fáculas, 109.
 Fricción tidal, 115.
 Fuerzas extratelúricas, 19.
 Fuerzas intratelúricas, 19.

G

Geosinclinal, 28, 29, 30, 31, 37, 74, 75, 79, 81, 84, 85, 91, 97, 113, 149, 150, 152, 158, 160, 162, 182 y 183.
 Glaciación, 176.
 Glaciación cuaternaria, 118.
 Glaciación pérmica, 127, 176.
 Glaciarismo, 50.
 Gobi, 97.
 Golfo de Guinea, 118, 124 y 125.
 Gravimetría, 33.

Great Basin, 182.
 Groenlandia, 51 y 118.

H

Harz, 28.
 Hemisferio boreal, 94.
 Himalaya, 27.
 Hipótesis de Darwin, 100.
 Hipótesis de Fr. Pockels, 102.
 Hipótesis de Pickering, 99.
 Hipótesis de la contracción, 130, 151, 164 y 175.
 Hipótesis de la diferenciación, 95.
 Hipótesis de la excentricidad, 115.
 Hipótesis de la segregación de la Luna, 97.
 Hipótesis de las corrientes profundas, 66, 78, 81 y 86.
 Hipótesis de los ciclos, 93.
 Hipótesis de los desplazamientos continentales, 117.
 Hipótesis de los desplazamientos corticales, 111.
 Hipótesis de los levantamientos, 87.
 Hipótesis de los levantamientos y hundimientos, 113.
 Hipótesis de los resbalamientos, 66, 70 y 71.
 Hipótesis de Wegener, 119.
 Hipótesis del over-head-stopping, 162.
 Hipótesis del retardo rotatorio, 102.
 Hipótesis meteórica, 56, 59.
 Hipótesis nebular, 56 y 59.
 Hipótesis pendular, 108.
 Hipótesis plutónica, 87 y 92.
 Hipótesis térmica, 66, 73, 75, 78 y 168.
 Hornos (cabo), 125.

I

- India, 118.
 Irlanda, 125.
 Isostasia, 25, 26, 28, 30, 33,
 74, 78, 79, 81, 96, 127 y
 172.
 Isostática (compensación),
 152.
 Isostático, 123.

J

- Japón, 49.
 Jordán, 163.
 Júpiter, 57, 60, 61, 62 y 64.
 Jura, 183.
 Jura suizo, 88.

L

- Labrador, 30 y 176.
 Ley de Bayle y Mariotte, 92.
 Ley de Maxwell, 135.
 Ley de Kepler, 139.
 Luna, 44, 47, 48, 62, 93, 97,
 98, 99, 100, 101, 102, 103,
 108, 110, 117, 131, 133,
 138, 139, 140, 146, 187,
 189 y 191.

M

- Maare, 188.
 Manchas solares, 103.
 Mantos de corrimiento, 184.
 Mar Rojo, 163 y 178.
 Marea, 98, 100, 103 y 115.
 Mares lunares, 188.
 Marte, 57, 59, 60 y 189.
 Mediterráneo, 29.
 Mercurio, 60 y 189.
 Mesozoico, 118.
 Meteoritos, 142.
 Mongolia, 49.
 Montañas de reborde, 90.
 Montañas periféricas, 90.
 Montañas Rocosas, 68 y 77.

Movimientos eustáticos, 154.

N

- Nebulosa cósmica, 134 y 169.
 Necks, 56.
 Neptunismo, 17.
 Neptuno, 60.
 Norteamérica, 118, 125, 126.
 Núcleo, 21, 22, 136, 141, 167.
 Nueva Pomerania, 163.
 Nueva Zelanda, 52.

O

- Océanos, 23, 28, 93, 116, 117
 y 140.
 Océano Indico, 118 y 141.
 Onda sísmica, 21.
 Ondulaciones anisostáticas,
 91.
 Orion, 59.
 Orionis, 59.
 Ormuzd (estrecho de), 163.
 Orogénesis, 31, 32, 39, 69,
 127, 148, 157 y 185.
 Orogénico, 82.
 Oscilaciones, 184.
 Oslo, 70.

P

- Pacífico, 34, 94, 118, 120,
 121, 124, 141, 155, 163 y
 164.
 Paleozoico, 118.
 Panamá (istmo de), 125.
 Paroxismos, 32 y 33.
 Península balcánica, 183.
 Períodos anorogénicos, 32.
 Período de Chandler, 41.
 Períodos epirogénicos, 31.
 Períodos glaciares, 49 y 55.
 Períodos orogénicos, 31, 154.
 Pérmico, 118 y 176.
 Pirineos, 155.
 Plegamientos terciarios, 170.

Pleistoceno, 126.
 Pléyadas, 59.
 Pliegues alpinos, 29.
 Pliegues caledonianos, 29.
 Pliegues hercinianos, 29.
 Pliegues huronianos, 29.
 Plutonismo, 17 y 18.
 Polares (desplazamientos),
 40, 47, 49, 50, 51, 92 y 110.
 Polares (migraciones), 40 y
 50.
 Polarífugo, 105.
 Polo, 122 y 127.
 Polo (migración), 122, 123
 y 127.
 Polo Norte, 118.
 Polo (oscilaciones del), 41,
 42 y 175.
 Polo Sur, 118 y 176.
 Polos (fuga de los), 113.
 Puentes continentales, 30 y
 173.
 Puna de Atacama, 88.

R

Race (cabo), 125.
 Regresiones, 32.
 Revoluciones, 31.
 Rhin, 163.

S

Sal de Glauber, 80.
 Saturno, 99.
 Sial, 25, 27, 72, 93, 95, 112,
 120, 121, 140 y 162.
 Siberia, 50.
 Sierras pampeanas, 88.
 Sima, 25, 27, 72, 93, 94, 95,
 105, 107, 118, 119, 121,
 123, 126, 140 y 162.
 Sol, 51, 54, 58, 60, 61, 62,
 63, 64, 98, 100, 109, 110,
 117, 131, 133, 141 y 166.

Spitzberg, 51.
 Suabia, 36.
 Sudáfrica, 129 y 176.
 Sudamérica, 118, 129 y 176.
 Sudasia, 176.
 Superficie de compensación,
 27.

T

Tarim, 97.
 Tectogénesis primaria, 71 y
 92.
 Tectogénesis secundaria, 71.
 Teoría catastrófica, 17.
 Teoría de la contracción, 18,
 37, 64, 65 y 68.
 Teoría de Laplace, 60 y 62.
 Teoría de las oscilaciones, 92.
 Teoría de las undaciones, 72.
 Teoría pendular, 119.
 Terciario, 96 y 126.
 Terranova, 125.
 Terremotos, 34, 36 y 39.
 Tethys, 29.
 Tibet, 151 y 182.
 Tokio, 49.
 Transgresiones, 32.

U

Undaciones, 148, 161 y 172.

V

Venus, 51.
 Volcanismo, 16 y 34.

W

Wald de Baviera, 162.
 Wargentín (cráter), 188.
 Wesergebirge, 70.

Z

Zonas orogenéticas, 91.

SUMARIO

	<i>Págs.</i>
Breves palabras del traductor	7
Prólogo	11
HIPÓTESIS GEOTECTÓNICAS	15
Introducción	15
I.—Hechos de observación y sus consecuencias teóricas...	19
§ 1 Estructura interior de la Tierra	20
§ 2 Continentes y océanos	23
§ 3 El principio isostático	24
§ 4 Los geosinclinales. Permanencia de los continen- tes y los océanos	28
§ 5 Periodos orogénicos y epirogénicos. Marcha efica- ca de la evolución	31
§ 6 Volcanismo y terremotos	34
§ 7 Desplazamientos de la corteza	36
§ 8 Migraciones polares	40
§ 9 Los periodos glaciares	49
§ 10 Problemas cosmogónicos	55
II.—Las hipótesis geotectónicas	65
§ 11 La hipótesis de los resbalamientos	66
§ 12 La hipótesis térmica	73
§ 13 La hipótesis de las corrientes profundas	78
§ 14 La hipótesis plutónica o de los levantamientos...	87

§ 15	La hipótesis de los ciclos, de Joly	93
§ 16	La hipótesis de la diferenciación, de C. Mordziol.	95
§ 17	Hipótesis fundadas en el movimiento de rotación	
	o revolución terrestre	97
	a Hipótesis de la segregación de la Lama, de W. Pickering y G. H. Darwin	97
§ 18	ε La hipótesis del retardo rotatorio, de A. Böhm	102
§ 19	γ El desplazamiento «polifugo» de los conti- nentes, según A. Wegener y W. Köppen.	105
§ 20	δ La hipótesis pendular de H. Simroth	108
§ 21	ε La hipótesis de los desplazamientos cortica- les, de Kraichgauer	111
§ 22	ζ La hipótesis de los levantamientos y hundí- mientos, de O. Baschin	113
§ 23	η La hipótesis de la excentricidad, de A. Blytt.	115
§ 24	La hipótesis de los desplazamientos continenta- les	117
§ 25	La hipótesis de la contracción	130
	a El hecho de la contracción	130
§ 26	ε La evolución pregeológica	133
§ 27	γ El metabolismo en el interior de la Tierra.	141
§ 28	δ La evolución tectónica de la corteza terrestre.	147
§ 29	ε Juicio crítico de la hipótesis de la contrac- ción.	164
§ 30	Conclusión	185
Bibliografía relacionada con la obra «Hipótesis Geotectó- nicas», de Fr. Nölke		193
Índice de autores citados		199
Vocabulario		203

