

El origen de los continentes y océanos

Alfred Wegener

Introducción de Francisco Pelayo López

Epílogo de Francisco Anguita Virella

Traducción castellana de Francisco Anguita Virella y
Juan Carlos Herguera García

CRÍTICA
BARCELONA

Primera edición en Crítica: enero, 2009
Primera edición de esta nueva presentación: enero, 2018

El origen de los continentes y océanos
Alfred Wegener

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal)

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita reproducir algún fragmento de esta obra.
Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47

Título original: *The Origins of Continents and Oceans*

© de la Introducción, Francisco Pelayo López, 2009

© del Epílogo, Francisco Anguita Virella, 1983

© de la traducción, Francisco Anguita Virella y Juan Carlos Herguera García

© Editorial Planeta S. A., 2017
Av. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)
Crítica es un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.

editorial@ed-critica.es
www.ed-critica.es

ISBN: 978-84-17067-62-5
Depósito legal: B. 28555 - 2017
2017. Impreso y encuadernado en España

CAPÍTULO 1

PRELIMINARES HISTÓRICOS

Los antecedentes de este libro no carecen totalmente de interés. Tuve la primera intuición de la movilidad continental* ya en 1910, cuando, al contemplar un mapamundi, me impresionó la coincidencia de las costas de ambos lados del Atlántico; pero por el momento no hice caso de esta idea, que me pareció inverosímil. En el otoño de 1911 conocí, a través de un trabajo de síntesis que cayó en mis manos por casualidad, los resultados paleontológicos, para mí desconocidos hasta entonces, referentes a las primitivas conexiones continentales entre Brasil y África.**

Esto me llevó a un examen atento, aunque por el momento fugaz, de los resultados de las investigaciones geológicas y paleontológicas referidas a esta cuestión, investigaciones que produjeron enseguida confirmaciones tan importantes que hicieron arraigar en mí el convencimiento de que eran básicamente correctas. El 6 de enero de 1912 avancé por primera vez la idea en una conferencia que impartí en la Sociedad Geológica, en Frankfurt, y cuyo título era «El desarrollo de las grandes unidades de la corteza terrestre (en continentes y océanos) desde el

* La expresión original «Kontinentverschiebungen» significa literalmente desplazamiento o movilidad continental, y, sin embargo, ha sido vertida (al inglés primero, y luego a otros idiomas, entre ellos el español) como «deriva continental», concepto que se ha hecho mucho más conocido; aun así, hemos preferido casi siempre usar la traducción literal de la expresión alemana, sobre todo porque Wegener evitó, sin duda ex profeso, el término deriva («Abtrift») y sólo utilizó otro similar («Wanderung», migración) para referirse a la muy distinta deriva polar (véase capítulo 8). (*N. de los t.*)

** Aunque Wegener nunca aclaró expresamente a qué trabajo se refería, Brouwer (1980) opina que se trata de una síntesis de Krenkel sobre el Cretácico de África publicada en la revista *Geologische Rundschau* en 1911. (*N. de los t.*)

punto de vista geofísico». A esta conferencia siguió, el 10 de febrero, una segunda sobre «Las traslaciones horizontales de los continentes», ante la Sociedad para el Progreso de las Ciencias de la Naturaleza, en Marburg. En aquel mismo año siguieron mis dos primeras publicaciones sobre este tema [1, 2], pero luego la participación en la travesía de Groenlandia como miembro de la expedición de J. P. Koch en 1912-1913, y posteriormente el servicio en el frente, me impidieron seguir desarrollando la teoría. Sin embargo, en 1915 aproveché un largo permiso por enfermedad para publicar, en la Colección Vieweg y bajo el mismo título del presente libro, una descripción bastante detallada de mi idea [3]. Al final de la guerra fue necesaria una segunda edición (1920), que la editorial consintió amablemente en realizar en la sección de Ciencias Naturales de la misma colección, con lo cual abría la posibilidad de un estudio a fondo que suponía un avance considerable sobre la anterior presentación de la teoría. En 1922 apareció la tercera edición, de nuevo esencialmente mejorada. De ella se hizo una tirada desacomodadamente alta, a fin de posibilitar la dedicación a otros trabajos durante algunos años; pero ya está agotada desde hace algún tiempo. De esta edición se hicieron una serie de traducciones: dos en ruso, una en inglés, una en francés, una en español y una en sueco. Para la última, que apareció en 1926, he efectuado algunas correcciones del texto original.

La presente cuarta edición del original alemán ha sido totalmente corregida de nuevo; de hecho, ha faltado poco para que adquiriera un carácter diferente al de sus predecesoras. Aunque cuando escribí la anterior edición existía ya una voluminosa e importante bibliografía sobre el tema de la movilidad continental, esta bibliografía se limitaba esencialmente a declaraciones de aceptación o rechazo, o bien a citas de observaciones aisladas que podían utilizarse, o así parecía a sus autores, a favor o en contra de la teoría. Pero desde 1922 no sólo han aumentado extraordinariamente las discusiones sobre este tema en las diferentes ciencias geológicas, sino que el carácter mismo de la discusión ha variado también, en cuanto que la teoría es ahora utilizada cada vez más como base para ulteriores investigaciones. Además, hay que tener en cuenta la comprobación del desplazamiento actual de Groenlandia, hecho que, a juicio de mu-

chos, ha situado la discusión en un marco completamente distinto. Mientras que las primeras ediciones sólo contenían en esencia una exposición de la teoría en sí, y una compilación de los hechos que atestiguaban a su favor, la actual representa una forma de tránsito a una exposición sintética sobre estas nuevas líneas de investigación.

En mi actividad inicial sobre esta cuestión, y también ocasionalmente en su desarrollo posterior, encontré muchas veces que mis ideas concordaban con las de otros autores. Ya en 1857 Green hablaba de «segmentos de la corteza terrestre que nadan en el núcleo fluido» [63]. El giro de toda la corteza —cuyas partes no cambiaban, sin embargo, su posición relativa— había sido ya propuesto por varios autores, como Löffelholz von Colberg [4], Kreichgauer [5], Evans, y otros. Asimismo, H. Wettstein había escrito un libro [6] en el que, junto a un buen número de despropósitos, aparecía también la noción de grandes desplazamientos horizontales relativos de los continentes. Los continentes —cuyas plataformas, por cierto, este autor no tenía en cuenta— sufrían, según él, no sólo traslaciones, sino también deformaciones, y se movían todos juntos hacia el oeste, arrastrados por la fuerza de las mareas solares sobre el material viscoso de la Tierra (idea también apoyada por E. H. L. Schwarz [7]). Pero además, según Wettstein, los océanos eran continentes hundidos, y exponía fantásticas teorías, en las que no me detendré, sobre las que llamaba «homologías geográficas» y otros problemas de la superficie terrestre. Pickering, al igual que yo, se basaba en la coincidencia de las costas del Atlántico Sur en un trabajo [8] en el que expresaba la suposición de que América se había desgajado de Europa y África y se había desplazado a lo ancho del Atlántico. Pero no tuvo en cuenta que a partir de la historia geológica de esos continentes es obligado aceptar una conexión entre ellos hasta el Cretácico, y trasladó esta conexión hasta unos oscuros tiempos primigenios, especulando si la fragmentación estaría asociada con la teoría de G. H. Darwin, en su tiempo muy aceptada, de la expulsión centrífuga de la Luna desde la Tierra, cuya huella este último autor imaginaba ver todavía hoy en la actual cuenca pacífica.

En un trabajo corto publicado en 1909, Mantovani [86] ha expresado, ilustrándolas con mapas, ideas sobre traslaciones

continentales que en parte difieren ciertamente de las mías, pero que en algunos puntos, como, por ejemplo, respecto al agrupamiento de los continentes meridionales alrededor de Suráfrica, coinciden extraordinariamente con ellas. Señalaré brevemente que Coxworthy, en un libro aparecido en 1890, expuso la hipótesis de que los continentes actuales eran los fragmentos rotos de una masa única conectada en tiempos primitivos [9]; pero no he tenido ocasión de examinar personalmente ese libro.

También encontré grandes semejanzas con mis propias teorías en un trabajo de F. B. Taylor [10] aparecido en 1910, donde este autor acepta para el Terciario importantes traslaciones horizontales de los continentes, que relaciona con los grandes sistemas de plegamiento de esta época. Por ejemplo, para la separación de Groenlandia y Norteamérica llega prácticamente a conclusiones idénticas a las mías. Respecto al Atlántico, supone que tan sólo parte de él se ha originado por migración del bloque americano, mientras que el resto se hundió, originando la cresta centroatlántica: esta proposición se distingue sólo cuantitativamente —pero no en los aspectos nuevos y cruciales— de las mías. Por esta razón, los americanos denominan a veces teoría de Taylor-Wegener a la teoría de la deriva. Mi impresión, leyendo las publicaciones de Taylor, es que este autor buscaba un principio genético que explicase la disposición de las grandes cadenas de montañas, principio que creyó hallar en la deriva de los continentes desde los polos, y que en este orden de ideas la traslación de los continentes, tal como yo la concibo, jugaba tan sólo un papel subordinado y por ello su desarrollo se hacía muy escuetamente.

He conocido por primera vez todos estos trabajos, el de Taylor incluido, cuando ya había elaborado la teoría de la deriva en sus rasgos principales, e incluso algunos de ellos bastante más tarde. No hay que descartar que en el futuro se descubran otros trabajos que incluyan puntos de acuerdo con la teoría de la movilidad continental o bien que hubiesen anticipado algunos de sus temas. Todavía no se ha emprendido ninguna investigación histórica sobre este aspecto, ni es éste el propósito del presente libro.

CAPÍTULO 2

LA NATURALEZA DE LA TEORÍA DE LA DERIVA CONTINENTAL

SU RELACIÓN CON LAS TEORÍAS ACTUALMENTE DOMINANTES
SOBRE LOS CAMBIOS DE LA SUPERFICIE TERRESTRE EN LOS
TIEMPOS GEOLÓGICOS

Es un hecho singular y característico de lo incompleto de nuestros conocimientos actuales que se llegue a resultados completamente contrarios respecto a las condiciones de la Tierra en el pasado, según se aborde el problema a partir de aspectos biológicos o geofísicos.

Los paleontólogos, así como los zoólogos y botánicos, llegan una y otra vez a la conclusión de que la mayoría de los continentes separados hoy por anchos océanos ha debido tener en el pasado conexiones terrestres a través de las cuales se efectuó, sin impedimentos, un intercambio de la fauna y la flora terrestres. Los paleontólogos llegaron a esta conclusión al hallar numerosas especies idénticas que, según podía demostrarse, habían vivido en el pasado a ambos lados del océano, y cuya contemporaneidad hacía impensables orígenes separados en lugares diferentes. Y si bien se hallaba un porcentaje limitado de identidades en las faunas o floras contemporáneas, ello se explica fácilmente por la circunstancia de que tan sólo una parte del mundo orgánico viviente en aquel momento se conserva en estado fósil y se ha descubierto hasta hoy. Pues incluso si los organismos vivos de dos continentes antes unidos hubiesen sido completamente idénticos, lo incompleto de nuestros conocimientos tendría como consecuencia que los hallazgos efectuados a uno y otro lado resultasen sólo parcialmente idénticos, mientras que la mayor parte parecerían diferentes; y naturalmente, hay que tener también en cuenta el hecho de que los seres vivos, incluso

cuando la posibilidad de intercambio es total, no llegan nunca a ser completamente idénticos, como tampoco Europa y Asia tienen actualmente igual fauna y flora.

Al mismo resultado llegan las investigaciones similares sobre los animales y las plantas actuales. Las especies actuales de dos continentes como los que comentamos son ciertamente distintas, pero los géneros y familias siguen siendo los mismos; y lo que hoy es género o familia, fue especie en el pasado. Es decir, que el parentesco de fauna y flora actuales lleva a la conclusión de que estas faunas y floras fueron idénticas en el pasado, y, por tanto, que debe haber existido un intercambio, lo cual sólo puede imaginarse contando con una conexión terrestre muy extensa. Sólo tras la rotura de la conexión continental se separaron las faunas y floras en las diversas especies actuales. No es exagerado el decir que el desarrollo global de la vida en la Tierra y las relaciones entre los organismos actuales en continentes muy separados serían siempre un enigma insoluble si no aceptásemos esas antiguas conexiones terrestres.

Citemos solamente un testimonio entre muchos. De Beaufort escribe [123]: «Se pueden citar muchos otros ejemplos de los que se desprende que en zoogeografía es imposible llegar a una explicación razonable de la distribución de los animales si no se aceptan conexiones entre continentes hoy separados, y no solamente por medio de puentes continentales de los que, como dice Matthew, sólo se han quitado un par de tablones, sino también los que unían continentes ahora separados por el océano profundo».¹

1. Arldt [135] afirma: «También es cierto que todavía hoy existen algunos adversarios de los puentes continentales. Entre ellos hay que destacar especialmente a G. Pfeffer, que parte de la idea de que diferentes formas limitadas actualmente al hemisferio sur se hallan en estado fósil en el hemisferio norte. Es indudable, según este autor, que en el pasado estas formas estaban distribuidas más o menos universalmente. Ahora bien, si esta conclusión no es en absoluto convincente, menos todavía lo es la siguiente, a saber, que también haya que aceptar una difusión universal en todos los casos de distribución discontinua en el sur y en los que no se haya encontrado aún una prueba fósil en el norte. Si este autor quiere explicar todas las particularidades de distribución exclusivamente por migraciones entre los continentes septentrionales y sus puentes mediterráneos, esta suposición está fundada en bases muy

Naturalmente, muchas preguntas quedan insuficientemente aclaradas por esta teoría. En muchos casos, los antiguos puentes continentales han sido propuestos a base de indicios muy pobres, y no han sido confirmados por las investigaciones posteriores. En otros, no existe en absoluto unanimidad sobre el momento en el que la conexión cesó y se estableció la actual separación. Pero por lo que respecta a las más importantes de estas conexiones continentales, existe hoy entre los especialistas una unanimidad muy satisfactoria, no importa que basen sus conclusiones en la distribución geográfica de los mamíferos, las lombrices, las plantas, o cualquier otro tipo de organismo. Arldt [11] ha dibujado una especie de gráfico de opinión sobre la existencia o inexistencia de las diferentes conexiones continentales para los diferentes tiempos geológicos, a base de comentarios escritos o mapas publicados por veinte investigadores diferentes.² En la figura 2.1 se muestran gráficamente los resultados de esta encuesta, en lo que se refiere a las cuatro conexiones terrestres más importantes. En ella se han dibujado tres curvas por cada conexión continental: el número de las opiniones afirmativas, el de las negativas, y su diferencia, que refleja la fuerza de la mayoría, destacada mediante sombreado. La representación superior muestra que la conexión de Australia con la India, Madagascar y África (la antigua «Gondwana») duró, según la mayoría de los autores, desde el Cámbrico hasta el principio del Jurásico, pero desapareció a partir de ese momento; la segunda representación indica que la antigua conexión entre Suramérica y África («Arqueohelenis») cesó, según la mayoría de los investigadores, entre el Cretácico Inferior y Medio. Aún más tarde, en el límite entre el Cretácico y el Terciario, cesa, según el tercer gráfico, la conexión terrestre («Lemuria») entre Madagascar y el Decán.

inseguras». Que las afinidades de los continentes del sur se pueden explicar de forma más simple y completa mediante relaciones terrestres directas, que por migraciones paralelas a partir del continente único del norte, es algo que no requiere ninguna explicación, aunque en casos particulares el proceso puede haber sucedido tal como Pfeffer lo supone.

2. Arldt, Burckhardt, Diener, Frech, Fritz, Handlirsch, Haug, Von Ihering, Karpinsky, Koken, Kossmat, Katzer, Lapparent, Matthew, Neumayr, Ortman, Osborn, Schuchert, Uhlig y Willis.

La conexión entre Norteamérica y Europa fue considerablemente más irregular, como muestra el cuarto gráfico; sin embargo, y a pesar de los frecuentes cambios de actitud, también aquí domina una amplia coincidencia de opiniones: la conexión fue destruida repetidas veces en el pasado, concretamente en el Cámbrico y en el Pérmico, así como en el Jurásico y en el Cretácico, aunque al parecer solamente por «transgresiones» de poca entidad, que permitieron un posterior restablecimiento de la conexión. Pero la ruptura definitiva de la relación geográfica, como corresponde a la separación actual por un mar ancho y profundo, no puede haberse efectuado antes del Cuaternario, al menos en el norte, en la zona de Groenlandia.

Más adelante detallaremos muchos casos particulares. Aquí destacaremos tan sólo un aspecto que hasta ahora ha sido desatendido por los defensores de la teoría de los puentes continentales, y que es, sin embargo, de la máxima importancia: estas antiguas conexiones continentales no han sido propuestas sólo para lugares como el estrecho de Bering, donde hoy sólo un somero

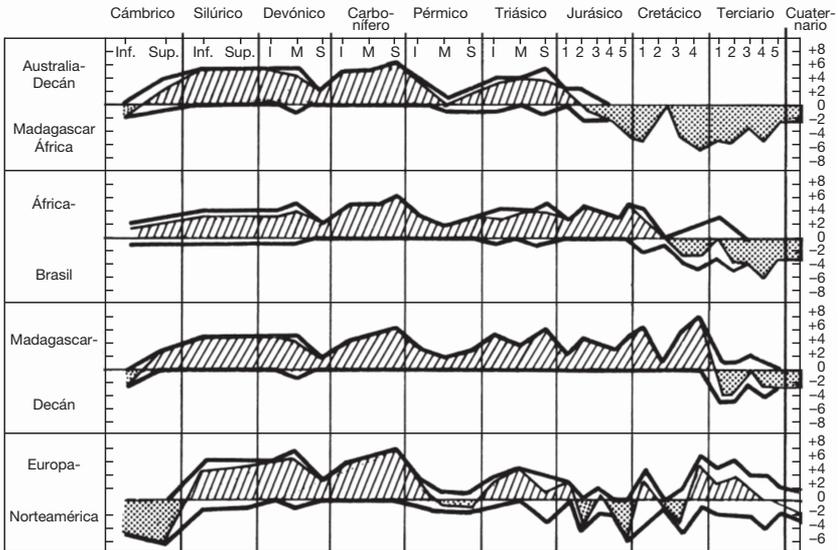


Figura 2.1. Número de respuestas afirmativas (línea gruesa superior) y negativas (línea gruesa inferior) a la pregunta sobre la existencia de cuatro puentes continentales desde el Cámbrico. La diferencia está rayada cuando es afirmativa, y punteada cuando es negativa.

mar de plataforma o mar transgresivo separa los continentes, sino también para los mares profundos actuales: los cuatro ejemplos de la figura 2.1 se refieren a casos de este tipo. Han sido elegidos a propósito, porque sirven para establecer los conceptos básicos de la teoría de la deriva, como vamos a mostrar a continuación.

Hasta aquí se ha admitido como evidente que las masas continentales —emergidas o sumergidas— habían conservado inmutable su posición relativa a lo largo de toda la historia de la Tierra, con lo que no quedaba más solución que aceptar que las conexiones terrestres propuestas habían existido en forma de enlaces entre los continentes hasta que el intercambio entre la fauna y la flora continentales cesó, momento en el que aquéllos se hundieron bajo el nivel del mar, para formar el fondo de los actuales mares intercontinentales profundos. Así se originan las conocidas reconstrucciones paleogeográficas, de las que la figura 2.2 representa un ejemplo para el Carbonífero.

La hipótesis de que existían continentes intermedios hundidos era, de hecho, la más inmediata, en cuanto que se basaba en el cuerpo de doctrina de la contracción de la Tierra, tema que deberemos examinar más detalladamente a continuación. Esta teoría se origina en Europa; fue establecida y elaborada por Dana, Albert Heim y Eduard Suess, y sigue dominando hasta el momento presente los conceptos básicos de la mayoría de los textos europeos de geología. La expresión más concisa de esta

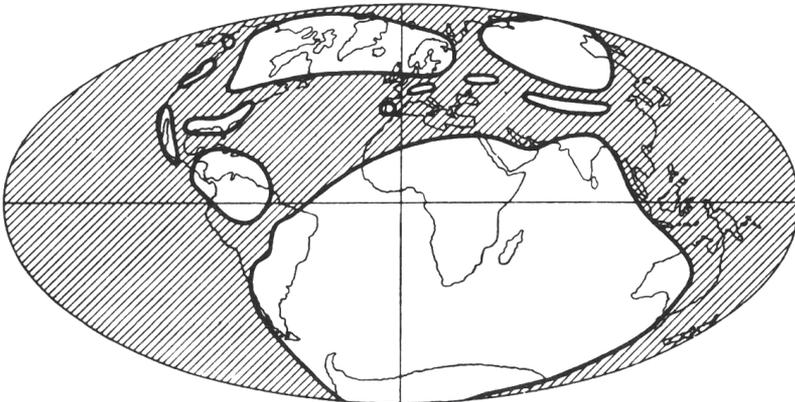


Figura 2.2. Repartición de mar (rayado) y tierra en el Carbonífero, según las teorías al uso.

teoría fue la acuñada por Suess: «Lo que estamos presenciando es el colapso de la esfera terrestre» [12, tomo 1, pág. 778]. Al igual que una manzana que se seca desarrolla arrugas en su superficie a causa de la pérdida de agua de su interior, así las cadenas de montañas plegadas en la superficie terrestre deben formarse a causa del enfriamiento del interior de la Tierra, y de la retracción consiguiente. A consecuencia de este hundimiento de la corteza, se supone que debe actuar sobre ella una «presión en bóveda» general que mantiene elevados fragmentos individuales que forman horsts, en cierto modo apoyados en la bóveda. Más adelante, estos fragmentos retrasados pueden adelantarse a los otros en el hundimiento, y entonces lo que era tierra firme se convierte en fondo marino, y a la inversa, pudiéndose repetir este ciclo indefinidamente. Esta teoría, que fue propuesta por Lyell, se basa en el hecho de que en casi todos los continentes se encuentran estratos depositados en mares antiguos. No se puede negar a esta idea el mérito histórico de haber proporcionado durante largo tiempo una síntesis adecuada de nuestra ciencia geológica. En este largo período de tiempo la teoría de la contracción ha sido aplicada en gran medida a los resultados de investigaciones concretas, con la consecuencia de que aún hoy sigue teniendo algo de atrayente, a causa de la atrevida simplicidad de sus ideas básicas y de la diversidad de sus aplicaciones.

Después de la imponente síntesis que para las ciencias geológicas supuso, desde el punto de vista de la teoría de la contracción, la obra en cuatro tomos de Eduard Suess, *La faz de la Tierra*, se han venido acumulando las dudas sobre la corrección básica de esta teoría. La hipótesis de que todos los levantamientos son sólo aparentes, y que en realidad consisten en retrasos en la tendencia general de la corteza a moverse hacia el centro de la Tierra, fue rebatida con la detección de levantamientos absolutos [71]. La idea de una presión en bóveda permanente y activa en todas partes, que ya fue refutada teóricamente por Hergesell [124] para las capas más altas de la corteza, se ha mostrado insostenible, puesto que las estructuras en Extremo Oriente y en las fosas de África oriental sugieren por el contrario fuerzas tensionales en grandes fragmentos de la corteza terrestre. La interpretación de las cadenas de montañas como arrugas superficiales debidas a la contracción del interior terrestre llevó a la

inaceptable consecuencia de que la presión tenía que transmitirse en el interior de la corteza terrestre a lo largo de distancias equivalentes a semicírculos máximos. En cambio, numerosos autores, como Ampferer [13], Reyer [14], Rudzki [15], Andréé [16], y otros, han adoptado y favorecido la posición de que la totalidad de la superficie terrestre debía ser afectada homogéneamente por las arrugas, como se ve en una manzana que se seca. Pero fue sobre todo el descubrimiento de las «estructuras de cabalgamiento» en escamas, o de los mantos de corrimiento de los Alpes, lo que hizo aparecer cada vez más inadecuada la explicación, ya de por sí difícil, del origen de las montañas por contracción. Esta nueva interpretación de la estructura de los Alpes y de muchas otras cadenas de montañas, introducida en los trabajos de Bertrand, Schardt, Lugeon y otros, condujo a la idea de que existían compresiones mucho mayores que las supuestas en la anterior teoría. Mientras que según esta última Heim calculaba para los Alpes un acortamiento de $1/2$, este mismo autor encuentra, tomando como base la estructura de cabalgamientos generalmente admitida hoy, un acortamiento de $1/4$ hasta $1/8$ [17]. Puesto que la anchura actual es de unos 150 km, se deduce que aquí se ha encajado un fragmento de corteza de 600 a 1.200 km (5 a 10 grados de latitud) de anchura; sin embargo, R. Staub [18], coincidiendo con Argand, ha realizado, en su síntesis más reciente sobre los cabalgamientos alpinos, cálculos de acortamiento aún mayores. En su página 257 llega a la conclusión siguiente:

El orógeno alpino es el efecto de la deriva hacia el norte del bloque africano. Si alisamos los pliegues y mantos alpinos en un corte transversal entre la Selva Negra y África, resulta una distancia original de 3.000 a 3.500 kilómetros frente a la actual de unos 1.800, es decir, una compresión alpina (en el sentido amplio de esta última palabra) de unos 1.500 kilómetros; para justificar este resultado es necesario que África se haya desplazado con respecto a Europa, con lo que se llega a una auténtica deriva continental de grandes dimensiones del bloque africano.³

3. Como puede verse, las estimaciones sobre la magnitud del acortamiento de los Alpes crecen continuamente. Así, Staub escribe nuevamente [214, y también 215]: «Imaginémonos ahora que desplegamos estos mantos apilados

En un sentido similar se han expresado también otros geólogos, como, por ejemplo, F. Hermann [106], Edward Hennig [19] o Kossmat [21], que destaca «que una explicación de la formación de las montañas debe incluir grandes movimientos tangenciales de la corteza, movimientos que no pueden encajarse en el conjunto de ideas de la teoría de la contracción». Refiriéndose a Asia, Argand [20], en una vasta investigación sobre la que volveremos más adelante, ha desarrollado ideas totalmente equivalentes a las expuestas por Staub y por él mismo sobre los Alpes. Cualquier intento de relacionar estas colosales compresiones de la corteza con descensos de temperaturas en el interior de la Tierra está condenado al fracaso.

Pero incluso la suposición básica, aparentemente innegable, de la teoría de la contracción (a saber, que la Tierra se está enfriando) ha quedado en entredicho tras el descubrimiento del radio. Este elemento, cuya desintegración genera calor continuamente, está contenido en cantidades mensurables en las rocas de la corteza que nos son accesibles, y las numerosas medidas llevadas a cabo conducen a la conclusión de que si el interior de la Tierra contuviese igual cantidad de radio, el calor producido debería ser incomparablemente mayor que el transportado hacia el exterior, magnitud esta que podemos calcular por el aumento de temperatura en las minas, teniendo en cuenta la conductividad de las rocas. Pero esto significaría que la temperatura de la Tierra tenía que elevarse continuamente. En realidad, la muy escasa radiactividad de los meteoritos férricos indica que el núcleo de hierro de la Tierra tiene, presumiblemente, mucha menor cantidad de radio que la corteza, así que la paradóji-

unos sobre otros docenas de veces ... entonces tenemos forzosamente que trasladar el rígido postpaís de los Alpes mucho más hacia el sur, y la distancia original entre antepaís y postpaís alpinos se multiplica por diez o por doce con respecto a la actual». Y continúa: «La creación de una cadena de montañas nos lleva de nuevo de forma clara e indudable a la deriva independiente de grandes bloques, que por su estructura son con seguridad continentales; así, a partir de la geología de los Alpes y de la teoría de Hans Schardt sobre los mantos, llegamos de forma completamente independiente y natural al reconocimiento de los principios básicos de la gran teoría de Wegener sobre la deriva de los bloques continentales».

ca conclusión anterior quizá es evitable; pero en cualquier caso, ya no se puede considerar actualmente el estado térmico de la Tierra como una instantánea tomada en un proceso continuo de enfriamiento del globo terrestre, sino más bien como un estado de equilibrio entre la producción de calor radiactivo del interior terrestre, y su emisión al exterior. En efecto, los últimos estudios sobre estas cuestiones, que serán debatidos en detalle más adelante, nos llevan a la conclusión de que al menos bajo los continentes se genera más calor del que es transportado, por lo que en ellos la temperatura debe aumentar, mientras que en las cuencas oceánicas la relación se invierte, predominando la transmisión sobre la producción. Así, para la Tierra en su conjunto se llega a un equilibrio entre producción y transmisión. En todo caso, se puede concluir que estas nuevas consideraciones privan a la teoría de la contracción de todo su apoyo.

Pero, además de ésta, ante la teoría de la contracción se presentan muchas otras dificultades. La hipótesis de que los continentes y las cuencas marinas se intercambian entre sí en el tiempo en una sucesión ilimitada, idea que fue sugerida por la presencia de sedimentos marinos en los actuales continentes, debe ser restringida considerablemente, pues los estudios más detallados de estos sedimentos han demostrado cada vez más claramente que se trataba, casi sin excepción, de sedimentos costeros. Se ha demostrado que muchos sedimentos que se creían depositados en mares profundos provienen de mares someros, como, por ejemplo, lo ha probado Cayaux para la creta: Dacqué [22] ha escrito una buena síntesis sobre esta cuestión. Sólo unos pocos sedimentos se siguen teniendo hoy como de origen muy profundo (4 a 5 km); entre ellos están las radiolaritas pobres en cal, de los Alpes, y ciertas arcillas rojas, que recuerdan a las arcillas rojas de los mares profundos. La principal razón es que a gran profundidad el agua de mar actúa sobre las calizas, disolviéndolas, pero la extensión espacial de estos genuinos sedimentos profundos sobre los continentes actuales es tan diminuta comparada con las dimensiones de estos últimos y de los sedimentos de origen somero depositados sobre ellos, que permite mantener la tesis de la naturaleza somera de los sedimentos marinos fósiles en los actuales continentes. Por el contrario, de este punto surge una seria dificultad para la teoría de la contracción:

puesto que los datos de la geofísica nos obligan a incluir los mares someros en los continentes, la naturaleza de los sedimentos marinos fósiles significa que los bloques continentales han sido «permanentes» a lo largo de la historia de la Tierra y que jamás han formado parte de los fondos marinos. Entonces, ¿tenemos derecho a suponer que los actuales fondos marinos profundos fueron alguna vez continentes? Es evidente que la legitimidad de esta conclusión ha desaparecido al comprobarse la naturaleza somera de los sedimentos marinos en los continentes. Pero aún hay más, pues esta conclusión nos conduce ahora a una contradicción abierta: si reconstruimos los puentes intercontinentales del tipo ilustrado en la figura 2.2, ocupando así gran parte de las actuales cuencas marinas profundas, sin poder compensar este hecho con la inmersión de los continentes actuales hasta el nivel del mar, las masas de agua del océano universal no tienen ya sitio en las reducidas cuencas marinas: el desplazamiento de agua por parte de los puentes intercontinentales habría sido tan gigantesco que el nivel del océano universal sobre los continentes habría subido, inundándolo todo (tanto los actuales continentes como los intercontinentales), con lo que la reconstrucción no alcanza el objetivo propuesto, que era demostrar la existencia de conexiones terrestres sobre el nivel del mar entre continentes no inundados. La figura 2.2 muestra, pues, una reconstrucción imposible, a no ser que introduzcamos hipótesis adicionales ad hoc que son poco verosímiles, como, por ejemplo, que en aquel tiempo la cantidad de agua del océano universal era menor que en la actualidad justo en la cantidad requerida, o que las restantes cuencas marinas de aquella época eran más profundas que las actuales justo en la cantidad requerida. Willis, A. Penck y otros han llamado la atención sobre estas dificultades.

De las numerosas objeciones contra la teoría de la contracción destacaremos, por último, una que tiene una importancia muy especial. A través, sobre todo, de medidas de gravedad, la geofísica nos ha permitido llegar a la idea de que la corteza terrestre flota en equilibrio hidrostático sobre un sustrato denso y viscoso: a este estado se le llama *isostasia*. La isostasia no es otra cosa que un equilibrio hidrostático regido por el principio de Arquímedes, por el que el peso de un cuerpo sumergido es igual al peso del fluido desalojado; sin embargo, la introducción de

una palabra especial para este estado es conveniente, porque el fluido en el cual se sumerge la corteza terrestre es probablemente de una viscosidad enorme, difícilmente imaginable, de forma que las oscilaciones con respecto a esta situación de equilibrio quedan excluidas, aunque la tendencia al equilibrio tras una perturbación es un proceso que tiene lugar con lentitud extrema y necesita muchos milenios para completarse; en el laboratorio este «fluido» apenas se distinguiría de un «sólido». Debe recordarse, sin embargo, que también en el acero, que consideramos un cuerpo sólido, se dan manifestaciones de flujo poco antes de su rotura.

Un ejemplo de una perturbación de la isostasia de la corteza terrestre lo tenemos en la sobrecarga que en ésta produce un casquete glaciar, proceso que tiene como consecuencia el lento hundimiento de la corteza y la tendencia a un nuevo estado de equilibrio proporcionado a la carga, para volver nuevamente y en forma paulatina el antiguo equilibrio una vez que el casquete se ha fundido, con lo que las líneas de costa formadas durante la depresión son levantadas. En este sentido, los «mapas de isobasas» construidos por De Geer [23] a partir de las líneas de costa muestran para la última glaciación en Escandinavia una depresión de al menos 250 m en la parte central, depresión que iría decreciendo gradualmente hacia el exterior; para la más extensa de las glaciaciones cuaternarias se aceptan valores aún más altos. En la figura 2.3 reproducimos un mapa de estas elevaciones postglaciales para Fenoscandia, según Högbom (en Born [43]). De Geer ha demostrado que el casquete glaciar norteamericano ha experimentado un proceso análogo. Rudzki [15] ha probado que siguiendo la teoría isostática se pueden calcular valores razonables para el espesor del hielo en los casquetes: 930 m para Escandinavia y 1.670 m para Norteamérica, donde el hundimiento alcanzó los 500 m. A causa de la viscosidad del sustrato, estos movimientos de ajuste van muy desfasados: en general, las líneas de costa se formaron después de la fusión del hielo, pero antes de la elevación del continente. Todavía hoy Escandinavia se eleva alrededor de un metro por siglo, como lo demuestran las medidas del nivel del mar.

También el depósito de sedimentos tiene como consecuencia el hundimiento del fondo de la cuenca, como muy acertada-

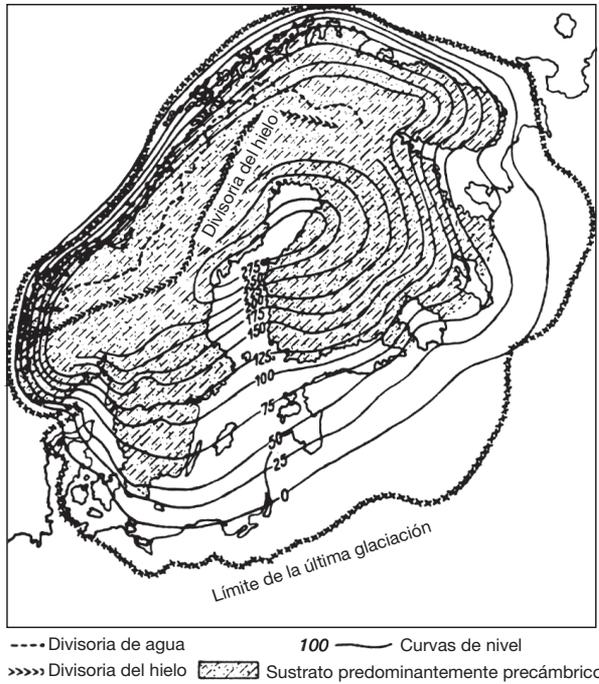


Figura 2.3. Magnitud (en metros) de la elevación postglacial en Fenoscandia, según Högbom.

mente reconoció Osmond Fisher por vez primera: cada depósito provoca el hundimiento de la base de los estratos, hundimiento que se produce también con cierto retraso, de forma que la superficie del nuevo estrato queda situada casi a la misma altura que la del anterior. De esta manera pueden generarse en aguas someras series sedimentarias de muchos kilómetros de potencia.

De la teoría de la isostasia trataremos con más detalle más adelante. Diremos ahora tan sólo que esta teoría ha sido confirmada hasta tal punto por las observaciones geofísicas, que actualmente forma parte de las bases más sólidas de la geofísica, y que ya no se puede dudar de que es básicamente correcta.⁴

4. Los americanos, como Taylor [101], incluyen a veces bajo el concepto de isostasia la hipótesis de Bowie sobre el origen de los geosinclinales y las montañas. Según la concepción de Bowie [224], los primeros levantamientos en la cuenca rellena de sedimentos, o geosinclinal, tienen lugar a causa de una