

GEOLÓGIA
ENTRE BAMBALINAS

BIBLIOTECA
CONOCIMIENTO

DIRIGIDA POR
MANUEL HURTADO DE MENDOZA

Publicados:

- | | |
|------------------------|---|
| FRED L. WHIPPLE: | TIERRA, LUNA Y PLANETAS. (2ª edición). |
| CAMPBELL Y JACCHIA: | HISTORIA DE LAS ESTRELLAS VARIABLES. |
| CAMPBELL Y JACCHIA: | ATOMOS, ESTRELLAS Y NEBULOSAS. (2ª ed.). |
| HARLOW SHAPLEY: | GALAXIAS. |
| B. J. BOK Y P. F. BOK: | LA VÍA LÁCTEA. |
| F. G. WATSON: | ENTRE LOS PLANETAS. |
| MARCEL BOLL: | ¿QUÉ ES LA ENERGÍA? (2ª edición). |
| H. FOX, R. H. AUSTIN: | |
| EDWARD S. C. SMITH: | LA ENERGÍA ATÓMICA APLICADA. |
| Y TOM SAWYER: | |
| T. S. LOVERING: | LOS MINERALES. |
| HORACIO J. HARRINGTON: | VOLCANES Y TERREMOTOS. (2ª edición). |
| DESIDERIO PAPP: | ADÓNDE VA EL GÉNERO HUMANO. |
| J. B. L. NOEL: | A TRAVÉS DEL TIBET HASTA EL EVEREST.
(2ª edición). |
| PAUL RADIN: | LOS INDIOS DE LA AMÉRICA DEL SUR. |
| JAMES S. GREGORY: | EL PAÍS DE LOS SOVIETS. |
| ALLEN MAWER, M. A.: | LOS VIKINGS. (2ª edición). |
| WINIFRED GALBRAITH: | LOS CHINOS. |
| E. WAY TEALE: | MARAVILLAS DE LA NATURALEZA. |
| J. OTERO ESPASANDÍN: | LA ANTÁRTIDA. |
| FÉLIX SARTIAUX: | LA CIVILIZACIÓN. (2ª edición). |
| A. VAYSON DE PRADENNE: | LA PREHISTORIA (2ª edición). |
| SIR JOHN MURRAY: | EL OCEANO. |
| W. J. BASSETT-LOWKE: | BARCOS Y HOMBRES. |
| GEORGE HOLLAND: | |
| IVÁN RAY TANNEHILL: | LOS CLIMAS EN LA TIERRA Y EN EL MAR. |
| J. OTERO ESPASANDÍN: | EL DEPORTE GRIEGO. |
| JULIÁN S. HUXLEY: | EL INDIVIDUO EN EL REINO ANIMAL. (2ª ed.). |
| F. W. GAMBLE: | EL MUNDO ANIMAL. (2ª edición). |
| FRANZ WEIDENREICH: | SIMIOS, GIGANTES Y HOMBRES. |
| K. BIRKET-SMITH: | RAZAS HUMANAS (2ª edición). |
| CARYL P. HASKINS: | LAS HORMIGAS Y EL HOMBRE (2ª edición). |
| HAROLD W. RICKETT: | LA TIERRA ES VERDE. |
| MERLE C. COULTER: | HISTORIA DEL REINO VEGETAL. (2ª edición). |
| ALDOUS HUXLEY: | EL ARTE DE VER (<i>Reeducación de la vista</i>).
(3ª edición). |
| W. H. MIKESSELL: | HIGIENE MENTAL. (2ª edición). |
| C. P. HICKMAN: | HIGIENE FISIOLÓGICA. |
| ADOLFO SALAZAR: | SÍNTESIS DE LA HISTORIA DE LA MÚSICA.
(2ª edición). |

HORACIO J. HARRINGTON

Ex Profesor de Geología de la Universidad de Buenos Aires y actualmente
de Investigación de la de Kansas, EE. UU. de Norte América.

GEOLOGÍA ENTRE BAMBALINAS

Con ilustraciones del autor

JOSE A. LUQUEZ
General Madariaga



BIBLIOTECA
PLEAMAR
CONOCIMIENTO

Adquiridos los derechos exclusivos para todos los países de habla española.

Queda hecho el depósito que previene la ley Nº 11.723

Todas las características gráficas de esta colección han sido registradas en la Oficina de Patentes y Marcas de la Nación

Copyright by Editorial Pleamar.

Buenos Aires, 1955.

Impreso en la Argentina - Printed in Argentine

INTRODUCCION

Este es un libro escrito como quien charla de bueyes perdidos, apoltronado junto a la estufa, estirando los pies hacia el fuego y con un vaso de whisky en la mano. Es un libro escrito porque sí. Porque los libros están para ser escritos. Pero confieso que me he divertido bastante al escribirlo sin tener que ceñirme, por una vez al menos, al seco y preciso rigorismo científico.

No estoy muy seguro acerca de lo que trata, pero si estoy seguro que no intenta presentar un panorama completo de la geología actual. Hubiera sido mucho trabajo y me hubiera aburrido como un elefante. (A juzgar por su tamaño, los elefantes deben aburrirse alrededor de 25 veces más que los hombres). Y el resultado hubiera sido igualmente aburridor (aunque mis dudas tengo de que no lo sea). Creo que el libro no pasa de ser una exposición, en lenguaje quizá demasiado informal y de entre casa, de un montón de teorías, hipótesis y explicaciones que forman, por así llamarle, el "cuerpo de doctrina" de la geología moderna. Con alguna incursión al campo de la historia un tanto risueña y desmelenada de la ciencia, que no sólo sirve para condimentar los entremeses, sino para entender mejor cómo y porqué se han formulado aquellas teorías, hipótesis y explicaciones. Algunas de las cuales tienen ya leve fragancia dogmática mientras otras son aún algo más que manzanas de discordia en el Olimpo geológico.

Es ésta una especie de "geología por dentro", vista desde las bambalinas. Como miembro que soy del gremio tengo entrada franca al proscenio y el privilegio de presenciar los ensayos.

Estoy, digamos así, en los "entretelones de la ciencia" y un poco en el secreto de cómo se elaboran las hipótesis y teorías, cómo se las adereza, cómo surgen de pronto elevándose como cañitas voladoras dejándonos boquiabiertos. Y cómo se desinflan, se disuelven en la Nada, explotando en un ramillete de chispas multicolores que brillan unos instantes antes de apagarse. Justamente cuando otra hipótesis se eleva rasgando el aire como nueva cañita voladora. Como se las defiende apasionadamente, demostrando una vez más que no hay instinto más poderoso que el de la maternidad ni amor más entrañable que el que se tiene por un hijo, aunque no sea más que un hijo intelectual. Como, en cuanto lanzamos una nueva idea, de hombres de ciencia que éramos (o creíamos ser) nos transformamos en aquello que Angel Gallardo llamara con razón "abogados de la ciencia", defendiéndola como leones no ya por su valor intrínseco sino porque es nuestra y dudar de ella equivale a dudar de nuestra capacidad intelectual y tenernos por zopencos. ¡Como si nuestra inteligencia tuviera algo que ver con la verdad científica (o de cualquier otra índole)! "Descartes tenía piedad de los Jonios. Descartes, a su turno, nos hace sonreír. Sin duda nuestros hijos se reirán mañana de nosotros". Y luego de estas palabras de Henry Poincaré, casi mejor terminar este prólogo con la última del de "I Pagliacci": "¡Incominciate!".

Kansas City.

Enero 1955.

MIDIENDO LA MANZANA

De las múltiples creencias que adornaban mi inocencia de niño, la última en abandonarme fué que Colón había inventado que la Tierra era redonda. Posiblemente la maestra no dijo "inventado" pero los niños no distinguen, por lo general, entre descubrir e inventar. Pero estoy seguro que dijo "redonda" y mi experiencia posterior me ha enseñado que muchos grandes no distinguen claramente entre redondez y esfericidad.

Quizá más curioso sea el hecho de que muchas personas sigan creyendo que los sabios de Salamanca se mofaron del "pobre hijo de un pobre cardador de lana" cuando les expuso su absurda y descomunal idea. Se me ocurre que si en verdad Colón hubiera expuesto su idea como novedosa primicia, los sabios se hubieran reído a sus anchas ante la absurda y descomunal ignorancia de quien sería Gran Almirante del Mar Océano.

Hace al menos 2.450 años que los pitagóricos de Crotona, en su afán de geometrizarlo todo, decidieron que la Tierra era esférica. Pero con entera seguridad el concepto, así como el teorema de Pitágoras "inventado" por el fundador de la escuela, era en Egipto más viejo que las pirámides. Y allá por el año 310, antes de nuestra Era, Dicearco, discípulo que fuera del divino Aristóteles, no solamente admitía que la Tierra era esférica sino que hasta se atrevió a calcular su circunferencia. Y no anduvo tan errado en su cálculo.

Pero un sino Spengleriano me predestinaba, desde niño, a errores en materia de esfericidad terrestre. Y a la maestra de

mis primeros años siguió el profesor de mi adolescencia quien me enseñó a pensar en Eratóstenes de Alejandría como en el primer calculista de la circunferencia. Años después di en “descubrir” que Dicearco se adelantó a Eratóstenes por cosa de medio siglo.

¿Cómo pudieron aquellos caballeros, con el instrumental primitivísimo de la época, calcular la circunferencia de la esfera terrestre? O con el instrumental moderno, que para el caso es lo mismo, ya que el método no ha variado un ápice. La cosa es la sencillez personificada. Consiste en medir, a lo largo de un círculo máximo, un sector de la circunferencia terrestre y luego el ángulo comprendido entre las líneas que, pasando por los extremos del sector medido, se cortan en el centro de la Tierra.

Veamos. Un meridiano es un círculo máximo terrestre. Elegimos dos puntos situados sobre un mismo meridiano y medimos como mejor podamos la distancia entre ellos. Y habremos obtenido la longitud del “sector de círculo máximo”. Falta ahora medir el ángulo. Sabemos que si suspendemos libremente una plomada en la superficie de la Tierra, la dirección del piolín, que marca “la vertical del lugar”, señala también directamente al centro mismo de la Tierra. La cosa es medir ahora el ángulo entre las dos verticales de los dos puntos sobre el mismo meridiano, cuya distancia en la superficie terrestre ya hemos obtenido. Y aquí es donde le salió un bulto a Dicearco.

El discípulo de Aristóteles era, sin duda, un gran viajero. Sus andanzas le llevaron por casi todo el mundo conocido y sus viajes fueron casi tan morrocotudos como los de Pérez Zúñiga y Xaudaró, pero en vez de correr tras un *trifinus melancolicus*, dedicó buena parte de su tiempo a visitar museos, bibliotecas y centros culturales. A más de gran viajero era gran observador y entre las cosas que observó fué que en la ciudad de Siena (la antigua Swân de los faraones, Sêwênêh de la Biblia y actual Aswân), los rayos del sol eran verticales durante el solsticio de verano, ya que iluminaban el fondo de los pozos. (La Historia nada nos dice acerca de qué pozos serían éstos. Simplemente pozos). Y el mismo día (de otro año, naturalmente, porque entonces como ahora no se puede estar al mismo tiempo en dos lugares distintos) observaba que en Lysimachia sobre

el Helesponto, pequeña ciudad griega en el golfo de Saros poco al norte de la actual Bulair, los rayos no eran verticales sino que hacían un ángulo bien notable con la dirección de la plomada. “Claro” — dijo —. “La razón es sencilla. El sol está tan, pero tan lejos que sus rayos, al llegar a la Tierra, son prácticamente paralelos entre sí. Y si son verticales en Siena tienen que ser oblicuos en Lysimachia, que está mucho más al norte, sobre el mismo meridiano. Ahora bien” — agregó —, “si mido el ángulo entre la dirección de los rayos solares y la vertical en Lysimachia, habré medido el ángulo entre la vertical en Siena y la vertical en Lysimachia porque ese día los rayos son paralelos a la vertical en Siena. Y dos cosas iguales a una tercera son iguales entre sí, etc.”.

Sólo los dioses saben cómo se las arregló para medir la distancia entre Siena y Lysimachia. Supongo que “a ojo de buen cubero”, calculando distancias por el tiempo que se tardaba en llegar de un punto a otro. De cualquier manera, la estimó en unos 8.300 estadios. Y luego midió el ángulo con un aparatito harto primitivo, llamado “gnomon”, que nada tiene que ver con Walt Disney, Blanca Nieves o los siete enanitos. Y obtuvo alrededor de 10 grados. Y dijo: “El ángulo de 10 grados es a la longitud del sector medido como los 360 grados del círculo total son a la longitud total de la circunferencia”. Y sacando su regla de cálculo multiplicó 8.300 por 360, dividió el resultado por 10 y obtuvo 300.000 estadios para la longitud total de la circunferencia terrestre. Como el estadio griego medía unos 185 metros, esto equivale a unos 55.500 kilómetros. La cifra resultó equivocada y un tanto excesiva no solamente por los “errores instrumentales”, si así pueden llamarse, al medir la distancia y el ángulo, sino también porque Siena y Lysimachia no están exactamente sobre un mismo meridiano y porque en Siena los rayos solares no alcanzan a ser verticales durante el solsticio de verano ya que la ciudad está algo así como un grado al norte del Trópico de Cáncer.

Eratóstenes, medio siglo después, realizó su cálculo partiendo de la distancia entre Siena y Alejandría, que estimó en unos 5.000 estadios. Con el mismo método del gnomon midió, en Alejandría, el ángulo entre la dirección de los rayos solares y la vertical del lugar durante el solsticio de verano y obtuvo

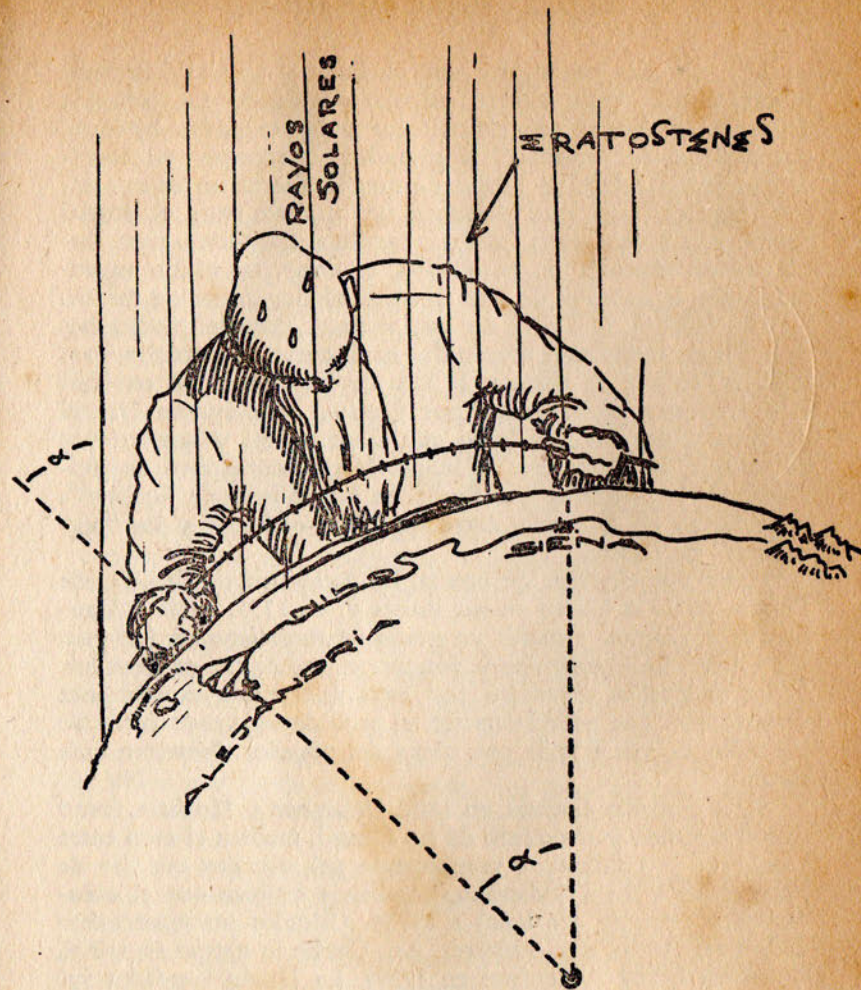
alrededor de 7 grados. Y realizando las mismas operaciones aritméticas que Dicearco obtuvo, como resultado final, 252.000 estadios para la longitud total de la circunferencia terrestre, o sea 46.620 kilómetros.

¡Sorprendente resultado! Se necesitaron más de 1.700 años para mejorarlo y llegar a la cifra correcta que es de unos 40.000 kilómetros.

Probablemente fué Fersel el primer occidental en seguir las huellas de Dicearco y Eratóstenes. En 1530 calculó la circunferencia terrestre partiendo de la distancia entre París y Amiens que midió contando las revoluciones de la rueda de un coche. Un siglo después, en 1630, Snellius ideó el procedimiento actual de medición geodésica de un "arco de meridiano" por medio de triangulación, pero al aplicar su método en Holanda, entre los paralelos de Leyde y de Berg op Zoom, obtuvo un resultado no muy halagador. Pero Picard, casi en seguida, midió el arco entre Malvoisine y Amiens aplicando el nuevo método y llegó a la cifra de 57.060 toesas de París para un grado de meridiano, es decir 111.212 metros. Cifra apenas si 20 metros menor que la real.

Todo anduvo bien hasta que Richer, en 1672, hizo una observación alarmante. Sabido es que el período de oscilación de un péndulo, es decir el tiempo que dura una oscilación, es directamente proporcional a la raíz cuadrada de su longitud sobre el valor de la aceleración de la gravedad en el punto de observación, todo eso multiplicado por la constante 2π . Si la longitud del péndulo es fija e invariable, el período de oscilación variará según las variaciones de la aceleración de la gravedad que dependen, a su vez, no sólo de la velocidad de rotación de la Tierra que es mayor en el ecuador que en los polos, sino también de la distancia al centro de la Tierra. En una Tierra perfectamente esférica inmóvil, la aceleración de la gravedad debe permanecer constante e igual a sí misma en todos los puntos de su superficie y en una Tierra perfectamente esférica pero en rotación, debe permanecer constante e igual a sí misma en todos los puntos de igual latitud geográfica, es decir en todos los puntos de un mismo paralelo.

Y bien. Richer observó la primera "anomalía" al comprobar que el péndulo de un reloj astronómico transportado a Cayena



Eratòstenes midiendo la manzana

oscilaba allí más lentamente que en París y que la diferencia sobrepasaba el valor teórico calculado teniendo en cuenta la diferencia de latitud geográfica entre ambas ciudades. Newton, que acababa de "inventar" la gravedad, interpretó esta observación como debida al hecho de que la Tierra no es una esfera regular, sino que presenta un abultamiento ecuatorial debido a la acción de la fuerza centrífuga. La Tierra, pues, debía ser un elipsoide de revolución, es decir, un sólido engendrado por la rotación de una elipse alrededor de su eje menor. En una palabra, la Tierra era una naranja. Pero las mediciones de arcos de meridianos efectuados hasta entonces parecían contradecir, en vez de afirmar, la idea de Newton y los astrónomos franceses capitaneados por Cassini, concluyeron que el diámetro polar era más largo que el ecuatorial y que, en vez de naranja, la Tierra era un limón. Magnífico motivo de controversias y polémicas que Swift, en los "Viajes de Gulliver", caricaturizó en la batalla entre los "little-endians" y los "big-endians" de Laputa.

Hubo que empezar de nuevo. La Academia de Ciencias de Francia tomó el asunto en sus manos y, en 1735, envió a Maupertuis y Clairaut a medir un grado de meridiano en Laponia, y a Godin, La Condamine y Bouguer a medir otro en Ecuador. Y los resultados obtenidos por estas dos épicas expediciones demostraron que, efectivamente, el arco de un grado cerca de los polos es más grande que cerca del ecuador. Newton tenía razón.

Siglo y medio después, en 1899, Delambre y Mechain, junto con el segundo y el tercero de los Cassini, medían el arco entre Dunkerke y Callione, y combinando sus cálculos con los de Maupertuis y La Condamine, llegaban a estimar que el achatamiento terrestre era igual a $1/334$. Cálculos posteriores han dado coeficientes algo mayores. Así, Clarke lo estimó en $1/293$, Bessel en $1/299$ y Helmert en $1/298$. La Unión Geofísica Internacional recomendó luego el promedio de $1/297$, teniendo en cuenta las mediciones de arcos de meridiano más precisas llevadas a cabo en Europa y América.

Pero si bien Newton tenía razón, no tenía toda la razón. A medida que se repetían mediciones pendulares en distintas partes de la Tierra, se fué viendo que nuestro globo no es ni

esfera ni esferoide de revolución, sino un sólido de forma peculiar, al que Listing, en 1872, y de manera un tanto redundante, propuso llamar "geoide", es decir, "forma de la Tierra". Hayford, en 1909, lo definió diciendo que "la superficie del geoide es una superficie que en todas partes es normal a la dirección de la gravedad (o de la plomada) y es aquella de estas superficies (que existen en diferentes alturas) que coincide con la superficie media del mar sobre los océanos".

Sobre unos dos tercios de la superficie terrestre, pues, la superficie oceánica representa la superficie real y física del "geoide", pero en los continentes no existe una representación similar. Se la obtendría, al decir de Hayford, "si surcáramos los continentes con canales a lo largo de paralelos y meridianos distantes 10 kilómetros unos de otros, de unos 30 centímetros de ancho y cuyos fondos se encontraran algo por debajo del nivel del mar. El agua de estos canales formaría superficies normales a la dirección de la plomada, pero si los canales fueran más anchos, las migraciones de masas de agua harían cambiar la forma del geoide en otras regiones del planeta".

Las mayores desviaciones de la superficie del geoide hacia arriba o hacia abajo de la superficie del elipsoide no sobrepasan los 100 metros. En términos generales, en el océano la superficie del geoide está debajo de la del elipsoide de rotación, asciende algo hacia las masas continentales y dentro de éstas se ubica por arriba del elipsoide. La línea de costa del mar, pues, coincide aproximadamente con la línea de corte de ambas superficies.

Obtenida la longitud total de un círculo máximo, se puede calcular inmediatamente el radio del mismo, y Hayford, en 1906, obtuvo el valor de $6.378.388 \pm 18$ metros para el radio ecuatorial. Este error de 18 metros en más o en menos es aún grande para estudios de alta geofísica.

La superficie y el volumen de la Tierra se desprenden de la fórmula de la esfera, introduciendo las necesarias correcciones por su divergencia con ese sólido. Cálculos modernos dan, para la superficie, el valor de 511 millones de kilómetros cuadrados y, para el volumen, 1.083 millones de kilómetros cúbicos.

Bastante más complicado resulta calcular el peso total de la Tierra y su densidad media, ya que ella entraña calcular previamente el valor de la llamada "Constante de Gravitación Universal" y el valor de la aceleración de la gravedad en el ecuador.

Cuando Newton vió caer la manzana, bolsiqueó en su gabán, sacó su libreta de apuntes y anotó inmediatamente:

$$P = K \frac{Mm}{r^2}$$

con lo que quiso decir que el peso de la manzana (P) puede considerarse como la fuerza de atracción que la masa de la Tierra (M) ejerce sobre la de la manzana (m) a la distancia del radio terrestre (r), considerando la masa de la Tierra como concentrada en su centro. Todo eso multiplicado por K , la "Konstante de Gravitación Universal". Por otra parte, en las primeras páginas de cualquier texto elemental de física encontramos que el peso de un cuerpo es igual al producto de su masa (m) por la aceleración de la gravedad (g) en el lugar de observación; es decir que $P = mg$. Y es más vale evidente, ¿no?, que por aquello de que dos cosas iguales a una tercera son iguales entre sí, m por g será igual a todo eso que está a la derecha del signo $=$ en lo que anotó Newton. Y si recordamos vagamente algo del álgebra elemental que aprendimos en el remoto pasado, tachamos m en los dos lados de la igualdad y dando vuelta la fórmula, como dedo de guante, nos queda:

$$M = \frac{g r^2}{K}$$

la masa de la Tierra en función de la aceleración de la gravedad, de su radio y de la famosa Konstante que aparece konstantemente en todas partes. Y una vez obtenida la masa, como conocemos el volumen de la Tierra, la densidad sale solita de la fórmula "masa es igual a volumen por densidad". Bueno; pero para calcular la masa de la Tierra tenemos que obtener

previamente los valores de la aceleración de la gravedad y de la Constante. ¿Cómo hacer?

El cálculo de la aceleración de la gravedad es bastante sencillo y puede realizarse por varios métodos, pero el más exacto de los imaginados hasta ahora es el del péndulo. Recuerdo que, de estudiante, realicé el experimento como parte de la rutina de física. Y el resultado fué tan fantástico que el profesor me felicitó por la precisión con que había determinado la gravedad de Neptuno. Teóricamente es muy fácil. Usted mide exactamente la longitud del hilo del péndulo y el tiempo que dura una oscilación. Y ya está. La aceleración de la gravedad es igual a $4\pi^2$ por la longitud del piolín, dividido por el tiempo al cuadrado. Sólo que medir *exactamente* no es tan fácil... Cálculos bastante mejores que los míos dieron a Kühnan y Fürtwangler la cifra de 978,049 gals para la aceleración de la gravedad en el ecuador, siendo el *gal* (abreviatura de Galileo) la unidad de aceleración, o sea un centímetro por segundo en un segundo. Heyl y Cook calcularon más tarde 978,036 gals y las mediciones llevadas a cabo por Clark en 1939 confirmaron esta última cifra.

Falta despejar la "Constante de Gravitación Universal" para poder calcular la masa de la Tierra y su densidad. De nuevo, ¿cómo hacer? A Newton mismo se le ocurrió el método que consiste en comparar la atracción que ejerce la masa de la Tierra sobre una manzana con la fuerza de atracción que una bola de plomo, colocada a pequeña distancia de la manzana, ejerce sobre esta última. Pero dos pequeños errores de cálculo, de los muy pocos que cometió Newton, le llevaron a creer que era prácticamente imposible medir la atracción entre dos masas en la superficie de la Tierra, ya que su efecto se ejercería casi imperceptiblemente. Por suerte los físicos no se conformaron con el "magister dixit", e investigaciones posteriores demostraron que la constante de gravitación universal es perfectamente calculable y que se la puede obtener tanto por métodos de laboratorio como de "aire libre".

El primer intento fué hecho por Bourguier y La Condamine durante la famosa expedición al Ecuador. En vez de manzana utilizaron una plomada y como "masa intermedia" entre la de la Tierra y la de la plomada, eligieron la mole del

volcán Chimborazo. La plomada, en las inmediaciones del cerro, debía ser desviada de la vertical y atraída ligeramente por la masa del volcán. De la comparación de las dos atracciones, Tierra-plomada y Chimborazo-plomada, debía surgir el valor de la constante. Pero las condiciones de trabajo en extremo arduas y difíciles, la imposibilidad de obtener una idea exacta del volumen del Chimborazo y de la densidad de las rocas que lo constituyen, llevaron al fracaso y el experimento no dió resultados positivos. La intentona tuvo, sin embargo, importancia capital porque sin duda Maskelyne se inspiró directamente en los trabajos de Bouguer para realizar su famosa experiencia en el monte Schehallion de Escocia.

Esta experiencia fué llevada a cabo en 1774, y Hutton, el "padre de la Geología", realizó el cómputo de los datos para obtener la densidad media de la Tierra. En un primer trabajo, publicado en 1778, Hutton llegó a la cifra de 4,5, pero más tarde, en 1821, la modificó por 4,95 tomando en consideración nuevos factores y, ante todo, un detenidísimo análisis, realizado por Playfair, sobre las rocas del monte Schehallion con el propósito de obtener la densidad media de las mismas.

La experiencia del monte Schehallion tiene no sólo el valor de ser la primera que dió un resultado positivo en lo que se refiere a la densidad media de la Tierra, sino que, en el transcurso de la misma Hutton ideó el método de representación topográfica por medio de curvas de nivel. Este método, inventado expresamente para medir el volumen del cerro, se ha convertido hoy en la base fundamental de la representación cartográfica del relieve terrestre.

Pero estos "métodos de aire libre" han sido suplantados hoy por métodos de laboratorio y sólo tienen interés histórico. La primera experiencia de laboratorio fué realizada por Cavendish entre 1797 y 1798, pero la idea primitiva corresponde a John Michell, quién, con la intención de medir la fuerza de atracción, estaba construyendo una balanza de torsión similar a la ideada por Coulomb poco tiempo antes para la medición de fuerzas magnéticas y eléctricas. La muerte sorprendió a Michell antes de terminar su balanza y el aparato pasó a manos de Wollaston, quien lo entregó más tarde a Caven-

dish. Y éste, luego de introducirle modificaciones y rehacerlo en gran parte, realizó sus primeros experimentos a fines de 1797.

La balanza de torsión consiste, en esencia, en un péndulo de torsión que puede oscilar alrededor de una determinada posición de equilibrio. Como definición es muy elegante, pero si no sabemos qué es un "péndulo de torsión" estamos fritos. Bueno; no es más que una barra horizontal suspendida por un hilo de su punto medio. Si queremos hacerlo mejor, colocamos una esferita de plomo en cada extremo de la barra. Un lápiz, suspendido por un hilo de coser atado en su parte media, es un "péndulo de torsión". ¿Por qué péndulo y por qué de torsión? Déle un leve papirotazo a una punta del lápiz y verá. (Papirotazo es una palabra difícil que aprendí hace poco y que por fin tengo oportunidad de emplear.) El lápiz gira como molinete horizontal enroscando al hilo y después gira en sentido contrario cuando el hilo se desenrosca primero, y después se enrosca al revés. Y después de varias enroscadas y desenroscadas se queda quieto. Por eso es "péndulo", por su movimiento armónico simple, y de "torsión" porque el hilo se enrosca, se retuerce. ¿Claro? Bien; si ahora acercamos dos esferas grandes de plomo a las esferitas de nuestra barra, de tal manera que las esferas grandes queden en lados opuestos de las pequeñas, la atracción ejercida por las esferas grandes tenderá a hacer girar la barra de torsión en un sentido dado. El ángulo de giro dará la torsión debida a las atracciones, y conociendo la cupla de torsión del hilo que suspende la barra para un ángulo dado de giro (es decir, la fuerza necesaria para hacerlo girar), puede calcularse la fuerza de atracción.

Las mediciones con balanza de torsión se han repetido numerosas veces, siempre perfeccionando el instrumento y afinando el método. Las determinaciones llevadas a cabo por Heyl en 1930 se consideran hoy las más precisas y se admite el valor de 6.670×10^{-8} dinas para la Constante de Gravitación Universal.

Con este valor y los ya apuntados para el radio ecuatorial y la aceleración de la gravedad en el ecuador, se obtiene fácilmente la densidad media de la Tierra que, en caso de utilizarse 978,036 gals, sería igual a 5,5167 y, en caso de preferirse 978,049

gals, sería de 5,5168. Por ello se considera actualmente como 5,5167(8).

Y ahora: ¿Qué más? Está muy bien eso de decir que la Tierra tiene forma de "geoide" y calcular sus dimensiones, su volumen, masa y densidad. Pero, ¿qué Tierra es ésta? Porque la nuestra, la que vemos a diario, no tiene superficie lisa ni forma de geoide, sino que tiene océanos, continentes, montañas. Está bien que los geofísicos nos "planchen" la Tierra para simplificar sus cálculos, pero no por eso nos olvidemos de los continentes y de las montañas.

Cierto es que los desniveles de la superficie terrestre no son gran cosa. El Everest mide 8.800 metros de altura y la fosa oceánica más profunda, el bajo del Emden, se hunde hasta unos 13.000 metros bajo el nivel del mar. Pero esta diferencia neta de unos 24 kilómetros es bien poco comparada con los 40.000 kilómetros que mide la circunferencia terrestre. Sería algo así como un finísimo grano de arena sobre esta página. Con todos, los desniveles existen. Hay océanos, continentes, montañas. Y lo que es más, sus proporciones relativas son muy dispares y su distribución irregular y caprichosa.

Los océanos abarcan hoy una superficie total de 361.160.000 de kilómetros cuadrados, mientras que la "tierra firme" alcanza sólo a 148.940.000 kilómetros. El mar cubre, pues, casi tres cuartas partes de la superficie terrestre, y nuestro planeta, en vez de llamarse Tierra debió llamarse "Océano".

La profundidad media del mar es de casi 3.700 metros y el volumen total de agua oceánica, según los cálculos más ultramodernos, llega a 1.3170.323.000 de kilómetros cúbicos. El Pacífico es el más profundo de los océanos y sus inmensas llanuras submarinas yacen a unos 4.300 metros bajo el nivel del mar. El Atlántico y el Índico son poco menos profundos y el Ártico alcanza a un promedio de sólo 1.200 metros.

Los continentes también tienen alturas variables. En conjunto se elevan unos pocos cientos de metros sobre el mar, pero Antártida, el más alto, alcanza a un promedio de 2.200 metros. En cambio, Europa y Australia apenas si sobresalen, en conjunto, unos 340 metros.

Curiosa es la distribución de los continentes y océanos. Todos los grandes bloques de tierra firme están agrupados en

un hemisferio, mientras que el opuesto está ocupado por la enorme cuenca del Pacífico. Esta evidente asimetría de la superficie terrestre es difícil de explicar y estamos aún lejos de haber hallado una respuesta que nos satisfaga a todos.

Notable es, también, el contraste entre las costas "pacíficas" y las "atlánticas" de los continentes. Las costas de tipo "pacífico" son paralelas a grandes cordilleras modernas, como los Andes y los Rockies de Sur y Norte América. Las "atlánticas", por el contrario, se independizan de las montañas. A lo largo de estas costas no hay montañas, o las hay muy antiguas, y en este último caso la línea de ribera corta oblicuamente a las montañas en vez de ajustarse a su rumbo, como en las "pacíficas". África, el continente "central", tiene costas atlánticas tanto al este como al oeste, pero las Américas y Asia tienen costas pacíficas de un lado y atlánticas del otro. Y esta "asimetría" necesita, también, una explicación no fácil de encontrar.

CURIOSEANDO EN EL INTERIOR DEL MUÑECO

Ya sabemos cómo es la Tierra "por fuera". ¿Cómo será por dentro? Lamentablemente, para contestar a esta pregunta no podemos volver a nuestros inquisitorios hábitos infantiles y despanzurrar el muñeco. La Tierra no se deja despanzurrar y los agujeros de exploración que le hemos hecho, apenas si de 5 ó 6 kilómetros los más profundos, son pinchazos más insignificantes que los de un mosquito sobre un elefante.

Debemos, pues, recurrir a métodos indirectos para saber "qué hay adentro". Pero, ante todo, ¿por qué lo de adentro ha de ser distinto de lo de afuera? ¿No podría ser todo lo mismo? Pues no. Hay razones poderosas que nos llevan a admitir que el interior de la Tierra, por siempre vedado a nuestros ojos, ha de hallarse constituido de manera muy distinta que la costra superficial. Y estas razones son, ante todo, inferencias basadas en observaciones concretas que se refieren a la temperatura de las capas superficiales, a las propiedades elásticas de la materia en el interior a la densidad media de nuestro globo.

La relación entre el interior de la Tierra y su corteza exterior atrajo ya la atención de los antiguos, quienes especularon acerca de qué era lo que soportaba la tierra conocida hasta entonces. Las opiniones estaban divididas, y mientras algunos pensaban en los anchos hombros de un gigante, otros se inclinaban por un elefante parado sobre una pacífica tortuga.

En tiempos más modernos, y como consecuencia de la teoría cosmogónica de Laplace, se creyó que la Tierra consistía en una delgada corteza de materiales cristalizados recubriendo un interior todavía líquido y a gran temperatura. En favor de esta hipótesis, que se mantuvo en auge hasta mediados del siglo pasado, se aducía la extrusión de lavas volcánicas en la superficie, la presencia de grandes masas de granito alojadas en las capas altas de la corteza terrestre, la existencia de fuentes termales y, sobre todo, el hecho de que la temperatura aumenta con la profundidad, siendo este aumento tal que, de continuar linealmente, a pocos kilómetros por debajo de la superficie debían reinar temperaturas suficientes para fundir todas las rocas. Y así nació el concepto de "corteza terrestre", como corolario de aquella teoría cosmogónica que postulaba una nebulosa gaseosa como progenitora de nuestro planeta.

Ya en 1839 Hopkins se alzó contra esta idea señalando que los esfuerzos distorsionales producidos por precesión y mutación polar serían suficientes para romper tal corteza sólida, y lord Kelvin, en 1862, demostró que una corteza así no resistiría las fuerzas disruptoras originadas por la atracción de las mareas solares y lunares. Más tarde nuevos argumentos se fueron acumulando en contra de esta idea y, entre ellos, el que tal estructura de la Tierra es incompatible con el achatación medido. Más serio e importante aún, que las ondas transversales producidas por terremotos no podrían transmitirse, como se transmiten, por el interior de la Tierra si éste fuera "líquido".

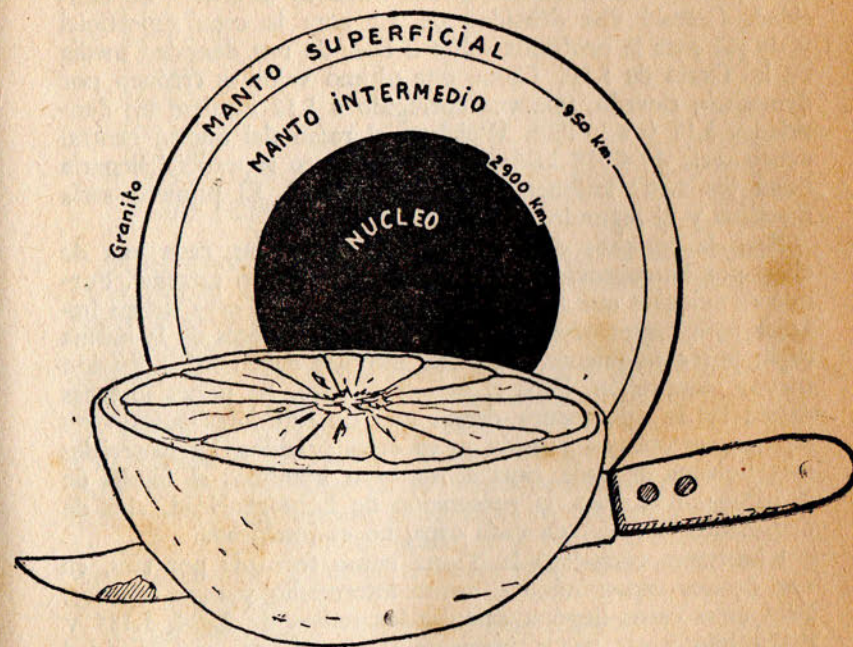
En la actualidad, pues, tanto geólogos como geofísicos han descartado definitivamente este concepto simplista que, sin embargo, tiene todavía (y no me explico bien por qué) gran aceptación popular.

Hoy aceptamos que la Tierra es esencialmente rígida, por lo menos desde su superficie hasta una profundidad de 3.000 kilómetros, y que no es homogénea radialmente, sino que existen importantes variaciones en el carácter, composición y estado físico de las materiales desde la superficie hasta el centro. Pero nuestras ideas sobre constitución interna de la Tierra, por cierto muy distintas de las que sostenían en el siglo pasado y marcando evidente progreso sobre ellas, son todavía bastan-

te confusas e imprecisas. Esta imprecisión se debe, por una parte, a la juventud de la geofísica como ciencia y, por la otra, a la ambigüedad con que empleamos términos tales como sólido, líquido, flúido, rígido, viscoso, resistente, plástico. Porque según como definamos estos conceptos, el vidrio puede ser un sólido o un líquido y el lacre puede ser rígido o plástico. Y si es difícil formarnos idea acerca del estado físico de los materiales en el interior de la Tierra, más difícil se nos hace saber cuál es su composición química. Qué son, de qué están hechos esos materiales.

Las ideas modernas sobre constitución interna de la Tierra se han ido elaborando en base a datos observacionales, inferencias, hipótesis y comparaciones tanto de orden intra como extra-telúrico. Y aquí cabe señalar los datos de la densidad, los de la temperatura, los de la radioactividad, los sísmicos, los meteoríticos, los empíricos que resultan de comparar la Tierra con un horno de fundición y los geológicos, derivados del estudio de la corteza superficial. El problema de conjunto es en extremo complejo y se resuelve en una infinidad de problemas menores estrechamente vinculados entre sí.

Veamos qué nos dice la densidad. Ya sabemos que la densidad media de la Tierra es poco menor que 5,52. La Tierra es cinco veces y media más pesada que el agua. Pero las rocas que constituyen su corteza tienen densidades mucho menores que ésta. Según las últimas apreciaciones de Washington e Iddings, publicadas en 1939 y obtenidas promediando los valores de más de 1.500 muestras de rocas diversas de todos los continentes, la densidad media de las rocas que forman la corteza superficial es de 2,79, apenas si algo más que la mitad de la densidad media de la Tierra. La simple comparación de ambos valores nos obliga, pues, a aceptar que, en el interior, deben existir forzosamente materiales más densos, más pesados que los que encontramos en la zona superficial del planeta. Los escasos conocimientos que hoy tenemos acerca del interior de la Tierra sugieren, como veremos más adelante, que los materiales profundos son tan densos que podrían ser metálicos, mientras la corteza superficial es rocosa. Y como rocas y metales no se mezclan libremente, debemos suponer límites



El interior de la Tierra

bastante bruscos entre estos materiales, con súbita discontinuidad en la densidad, formando capas sucesivas bien definidas.

Claró que hay varias hipótesis acerca de la distribución de la densidad en el interior de la Tierra. Siempre hay varias hipótesis para cualquier cosa. Weichert, por ejemplo, supone la Tierra compuesta por dos estratos o capas de densidad uniforme, el material interno y más denso extendiéndose hasta cerca de la superficie y el más liviano ocupando las regiones exteriores, existiendo entre ambos una marcada diferencia de densidad. Calculó una densidad de 3,2 para la capa superficial y de 8,2 para la profunda sobre la base de una densidad media de la Tierra de 5,58. Como este último valor es erróneo por demasiado elevado, una vez corregido a 5,52 resultan las densidades 3,17 y 8,1. Para Weichert el radio del núcleo central denso sería de 4.978 kilómetros y el manto superficial llegaría hasta los 1.400 kilómetros de profundidad. El primero sería metálico y el segundo rocoso.

Pero la hipótesis de dos capas caracterizadas, cada una de ellas, por homogeneidad completa, es demasiado extrema. Porque es evidente que las partes internas de cada capa deben hallarse bajo mayor presión que las partes exteriores de la misma capa, por consiguiente, las partes internas deben haber sufrido mayor compresión. Pero si éste es el caso, las partes internas deben haber sido menos densas que las exteriores cuando no estaban sometidas a presión o, en otras palabras, los materiales más livianos de cada capa se suponen hundidos al fondo de la misma. Así, pues, la presunción de homogeneidad, aun de densidades "locales" en cada capa, no es justificada.

Klussmann consideró la Tierra como formada por tres, en vez de dos capas: núcleo, manto intermedio y capa exterior. Para estas capas llegó a calcular los radios de 3.924, 5.185 y 6.378 kilómetros respectivamente y, asumiendo una densidad media de 5,53, obtuvo para el núcleo central la densidad de 8,75, para el manto 6,6 y para la capa superficial 3,2.

Los cálculos más modernos son los de Bullen, obtenidos en 1937 utilizando datos sismológicos, completados luego por Lambert en 1939. La tabla que va a continuación resume estos cálculos y da también los valores de la presión y de la aceleración de la gravedad en el interior de la Tierra, fácilmente

derivables una vez formulada la ley que nos da la distribución de la densidad.

<i>Distancia a la superficie en km.</i>	<i>Densidad (gm/cm³)</i>	<i>Presión (bars)</i>	<i>Gravedad (gals)</i>
6.378,0 (centro)	12,2	3,5 × 10 ⁶	0
5.740,2	12,1	3,4 "	214
5.102,4	11,9	3,2 "	426
4.464,4	11,4	2,7 "	623
3.826,8	10,8	2,2 "	809
3.189,0	10,1	1,63 "	973
2.551,2	5,4	1,15 "	1.007
1.913,4	5,1	0,87 "	980
1.275,6	4,7	0,52 "	981
637,8	4,3	0,23 "	992
0,0 (superf.)	2,7	0,0 "	982

¿Qué datos poseemos en lo que respecta a la temperatura en el interior de la Tierra? ¿Y qué conclusiones e inferencias podemos sacar de ellos?

Tenemos, en primer lugar, la temperatura de las lavas volcánicas medida en la superficie misma. Eso de medir la temperatura de una lava no es cosa tan sencilla que digamos; pero así y todo, se ha conseguido hacerlo en el Vesubio, el Etna y el Kilauea en Hawai. El Vesubio es bastante "frío" y las coladas de lava que salen de su cráter suelen estar a menos de 1.000 grados centígrados. El Kilauea, en cambio, generalmente las emite a más de 1.200 grados y a veces la temperatura se eleva hasta 1.300. El término medio esta, quizá, entre los 1.100 y los 1.200 grados.

Si las lavas están a semejante temperatura en la superficie de la Tierra, es evidente que en el interior de donde provienen debe haber un respetable calor. Y hallamos confirmación de esta idea en el hecho observacional de que la temperatura de las rocas aumenta en los túneles, minas profundas y perforaciones. Este aumento de temperatura es innegable hasta los seis kilómetros de profundidad, donde termina, por ahora, nuestra observación directa. Pero el aumento no es el mismo en todas partes.

La temperatura de la superficie misma de la Tierra depende pura y exclusivamente del sol, y si nuestro globo estuviera frío hasta su centro, no notaríamos ninguna diferencia. Pero la influencia de los rayos solares no se hace sentir sólo en la superficie, sino que penetra, si bien unos pocos metros, en el interior, hasta alcanzar una "capa neutra" donde ya no se registran fluctuaciones de temperatura diurnas o estacionales. En las zonas polares, donde el suelo está permanentemente helado, la profundidad de esta "capa neutra" es cero y coincide con el suelo mismo. En el ecuador la influencia de los rayos penetra hasta unos 20 ó 25 metros, y en las latitudes medias hasta 10 ó 15. Esta inalterabilidad de la temperatura en sótanos profundos se conoce desde hace mucho tiempo, y en Francia se la utiliza desde antiquísimo para añejar el vino.

Desde esta capa neutra hacia abajo estamos ya fuera de la influencia de los rayos solares y la temperatura comienza a aumentar lentamente. Temperatura propia de la Tierra. Y en las grandes minas o túneles podemos medir el aumento de temperatura que se registra por cada 100 metros que profundizamos en el interior. A esto llamamos "grado geotérmico", aunque es más frecuente dar la cifra de la "recíproca del grado geotérmico", es decir, la cantidad de metros que debemos profundizar en la Tierra para registrar el aumento de un grado centígrado de temperatura.

Los grados geotérmicos observados en distintas regiones distan mucho de ser uniformes. Aun sin tomar en cuenta las observaciones en zonas volcánicas donde el grado geotérmico es por completo anormal, las variaciones entre distintas regiones son muy grandes y no siempre fácilmente explicables. Aquí influyen, ante todo, las desigualdades topográficas, la percolación de aguas subterráneas frías o calientes, las acciones químicas tales como oxidación, hidratación y carbonización, las diferencias de conductibilidad térmica de las distintas rocas. Promediando las observaciones realizadas en 18 perforaciones profundas en Europa, Daly obtuvo 31,7 metros como "recíproca del grado geotérmico"; es decir, que por cada 31,7 metros de profundización la temperatura aumenta un grado centígrado. Promediando 14 sondeos profundos en Norteamérica obtuvo 41,8 metros, y parece que de esto sólo podemos

concluir que las rocas superficiales norteamericanas están bastante más frías que las de Europa. Actualmente se estima, descartando todos los factores de perturbación y promediando los valores más seguros, que el grado geotérmico "medio" para todo el mundo es de 3 grados centígrados por cada 100 metros. Daly, sin embargo, señaló muy justamente que se ha llegado a este valor promediando observaciones en pozos y sondeos de no más de 600 metros de profundidad y que es muy probable que el grado geotérmico verdadero sea algo mayor, quizá de 3,5 grados centígrados en vez de 3.

Si estos grados geotérmicos continuaran linealmente hasta el centro de la Tierra, éste debería hallarse, de aceptarse el primero, a una temperatura de 191.351 grados centígrados. Si, por el contrario, preferimos el gradiente de 3,5 por cada 100 metros, llegaríamos a la cifra de 223.243 grados centígrados para el centro del planeta. Difícilmente reinen allí semejantes temperaturas y hoy se admite que la verdadera ha de ser muchísimo menor. Tanto que algunos geofísicos, como Gutenberg, suponen que la temperatura real del núcleo ha de hallarse entre los 2.000 y 4.000 grados y "más próxima a 2.000 que a 3.000". Otros, como Kühn y Rittmann, la estiman en unos 12.000. Pero aun así estamos muy lejos de los 200.000 que resultarían de extrapolar directamente el grado geotérmico en la corteza superficial. ¿Por qué cálculos tan bajos para la temperatura central de la Tierra?

Hay varias razones poderosas que inducen a pensar que el grado geotérmico debe disminuir enormemente con la profundidad. Así, por ejemplo, estudiando Chapman las fluctuaciones del campo magnético terrestre, llegó a la conclusión de que la conductibilidad eléctrica comienza a aumentar gradualmente a unos 200 kilómetros de profundidad llegando a ser, a los 700 kilómetros, más de 100.000 veces mayor que la hallada en las rocas de la superficie. Y como sabemos desde hace justamente un siglo que para muchos materiales (y especialmente metales) la conductibilidad térmica es proporcional a la eléctrica, es evidente que al aumentar ésta, también aumentará aquélla. Al aumentar la conductibilidad térmica el grado geotérmico debe achicarse. Si tomamos una laja de piedra y la calentamos por una punta, el otro extremo permanecerá frío y el "grado

geotérmico", es decir, la diferencia de temperatura entre los dos extremos, será considerable debido a la mala conductibilidad de la roca. En cambio, si repetimos la operación con una barra de hierro se calentará todo el material y la diferencia de temperatura entre los dos extremos será mucho menor, debido a la buena conductibilidad del metal. No por nada los mangos de las cacerolas y sartenes se hacen de materiales malos conductores.

Pero el calor que hoy se escapa por la superficie de la Tierra no es solo debido a su enfriamiento progresivo sino también al que produce la desintegración de materiales radioactivos. Todas las rocas contienen pequeñas cantidades, pero apreciables, de uranio, torio, y otros elementos radioactivos que constantemente emiten calor al desintegrarse. La radioactividad de la corteza terrestre es tal que, por sí sola, podría mantener una temperatura de unos 500 grados en el interior. Hoy estamos prácticamente seguros, sin embargo, que la mayor parte del uranio, torio y demás elementos de este tipo está confinada a la parte más externa de la corteza terrestre, a los primeros 35 ó 40 kilómetros de profundidad y que el núcleo interno está casi desprovisto de estos elementos.

Por otra parte si la Tierra estuvo líquida en algún momento es evidente que debían producirse corrientes del interior a la periferia, tal como se producen en una olla de sopa al calentarla. Y estas corrientes, que transportaban calor desde el interior a la superficie, debieron tomar parte muy activa en la reducción del grado geotérmico. Por esta razón Gutenberg estima que en el momento en el cual comenzó la cristalización de los materiales en la superficie, la temperatura en el interior no se diferenciaba grandemente y no estaba muy por arriba de la del punto de fusión en la zona situada por debajo del nivel de cristalización. En ese momento "crítico" la temperatura de la parte exterior estaría dada por la del punto de fusión de las rocas, o sea unos 1150 a 1200 grados. Y desde allí aumentaría lentamente hacia abajo.

Veamos qué datos nos suministra ahora el estudio e interpretación de los grandes terremotos. Cuando se produce una perturbación, una ruptura, del equilibrio elástico en un cuerpo rígido — un golpe sobre una mesa, un terremoto en la Tierra —,

se generan, en general, dos tipos de ondas elásticas: ondas de "condensación - rarefacción" que entrañan cambios de volumen en el medio por el cual se propagan y ondas de "cizallamiento" o de "esfuerzo de corte" que sólo producen distorsión sin cambio de volumen. Al propagarse las primeras, las partículas del medio vibran para adelante y atrás a lo largo del camino de la onda y por eso se las llama también "ondas longitudinales". En las segundas, las partículas vibran hacia los lados, en planos normales al cambio de la onda, y por eso se las designa también "transversales". La tierra es un sólido rígido y elástico y al producirse la ruptura de equilibrio que significa un terremoto, se generan los dos tipos de ondas. Como las longitudinales son más veloces y llegan primero a los sismógrafos registradores de la perturbación, se las llama también "Primae Undae" (primeras ondas) y se las denota con la letra P. Las transversales, algo más lentas, llegan "segundas", "Secundae Undae", y se las abrevia con la letra S.

Sabemos que la velocidad de propagación de estas ondas P y S depende de las constantes elásticas del medio por el cual se transmiten y si el medio es *isótropo* — es decir, si la velocidad de propagación es igual en todas las direcciones —, midiendo independientemente las velocidades de ambos tipos de ondas podemos determinar fácilmente las constantes elásticas del medio. Pero la Tierra no es *isótropa*. En la superficie está formada por materiales muy heterogéneos que complican el problema y aunque a mayores profundidades parece estar constituida por materiales cuyas propiedades varían mucho menos radicalmente, no podemos aplicarle, sin más ni más, la simple teoría de elasticidad para sólidos isótropos.

El problema se complica todavía más por la incertidumbre acerca de la hora exacta en que se producen los terremotos. Si queremos calcular la velocidad con que un tren cubre el recorrido entre dos estaciones necesitamos saber la distancia entre las mismas, la hora exacta de llegada y la hora exacta de partida. Si queremos calcular la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, lo mismo. Necesitamos conocer la distancia entre las estaciones, entre el "foco" del terremoto y nuestro sismógrafo registrador, la hora exacta en que el sismógrafo acusa la llegada de las ondas y la hora exacta de "salida" es

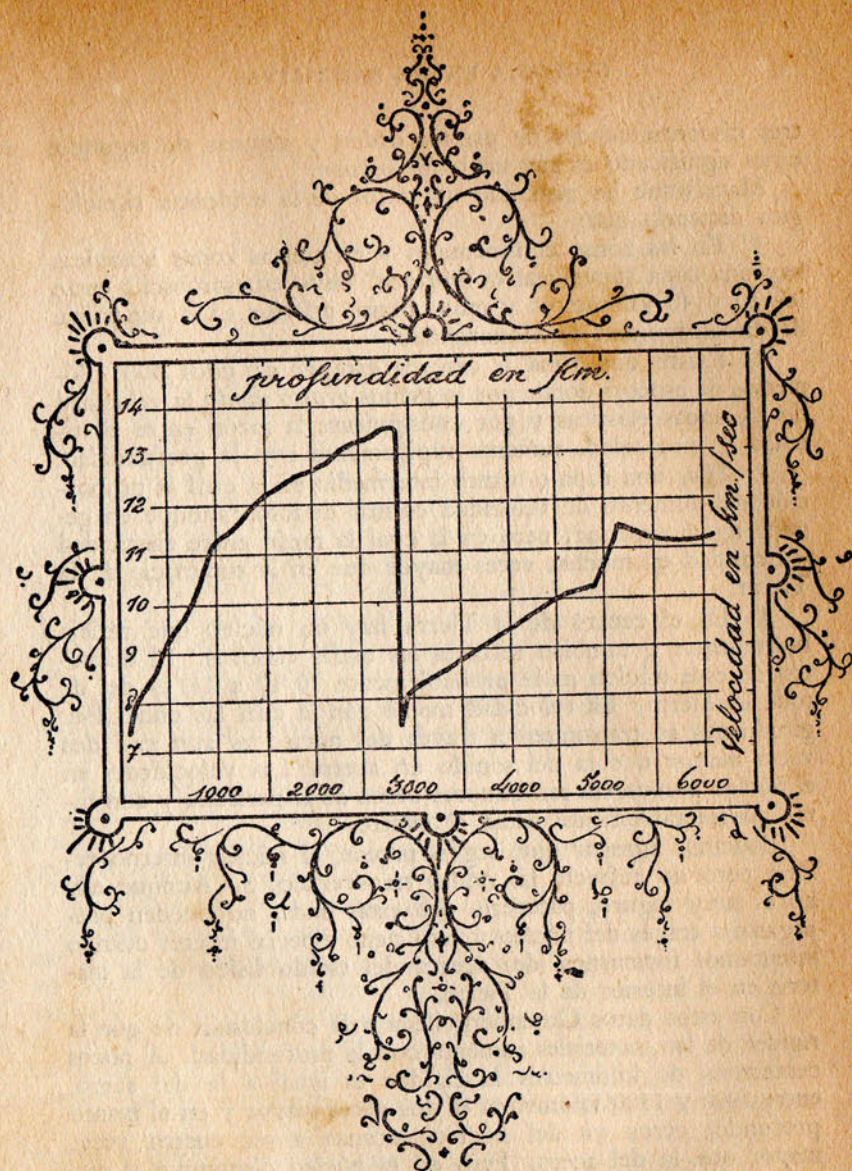
decir, la hora exacta en que se produjo el sismo. Y ésta nunca es conocida con la precisión deseable.

Por otra parte, las observaciones son todavía escasas y su exactitud muy desigual. Sólo en los últimos 20 años se han construido sismógrafos de gran precisión y sólo en los últimos 20 años el servicio radiotelegráfico internacional "distribuye" la hora exacta a todas las estaciones sismográficas del mundo. Además, los sismógrafos registran no sólo el paso de las ondas P y S "puras" sino todo un conjunto de ondas reflejadas, refractadas y compuestas. Por todas estas razones no se ha podido llegar aun a establecer un cuadro exacto de las variaciones en la velocidad de las ondas elásticas en el interior de la Tierra, pero tenemos ya un conjunto de datos que permiten formarnos al menos una idea aproximada y preliminar de lo que ocurre. Los geofísicos dicen que, para mejorar nuestros conocimientos, necesitamos urgentemente unos 20 ó 30 terremotos catastróficos...

Hoy sabemos que la propagación de las ondas elásticas sufre variaciones con la profundidad y que hay zonas donde esta variación es continua mientras que, en otras zonas, parece que existen límites bastante netos donde la variación es brusca y discontinua. Y se admite, por lo general, que existen tres "discontinuidades de primer orden" y varias de "segundo", entendiéndose por discontinuidad de primer orden una transición relativamente brusca que causa una brusca ruptura en la curva de velocidad-profundidad y, por discontinuidad de segundo orden, un cambio súbito en la *proporción* en que la velocidad aumenta o disminuye con la profundidad, originando un cambio súbito en la pendiente de la curva.

Las tres discontinuidades de primer orden llevan los nombres de sus descubridores: Mohorovičić, Repetti y Gutenberg-Weichert, pero todavía no hay completo acuerdo acerca de las profundidades en que se hallan. Las ideas más modernas las sitúan en 20-50, 950 y 2.900 kilómetros respectivamente, por debajo de la superficie.

El gráfico siguiente quiere representar esquemáticamente la curva velocidad-profundidad para las ondas longitudinales P, que es la mejor conocida. En ella resaltan claramente las



Curvas de velocidad y profundidad de las ondas sísmicas longitudinales.

tres discontinuidades de primer orden y algunas de segundo, cuyo significado es aún un tanto oscuro.

Macelwane ha resumido los datos de la evidencia sismológica diciendo que:

1º En las zonas continentales y en ciertas zonas oceánicas hay una capa superficial o "corteza" cuyo espesor oscila entre los 20 y 40 kilómetros y cuyo límite inferior es la superficie de discontinuidad de Mohorovičić.

2º Existe una zona o cáscara externa de unos 900 kilómetros de espesor donde por lo menos *grosso modo* la velocidad de las ondas elásticas y por consiguiente la razón entre elasticidad y viscosidad, aumenta rápidamente con la profundidad.

3º Hay una capa o manto intermedio en la cual la proporción del aumento de velocidad es más dudoso (aunque en general mucho menor) pero en la cual la razón entre elasticidad y densidad es muchas veces mayor que en la superficie de la Tierra.

4º En el centro de la Tierra hay un núcleo que refleja fuertemente y también refracta las ondas elásticas. El diámetro de este núcleo mide probablemente 10/19 a 11/19 del de toda la Tierra. La velocidad media con la cual las ondas longitudinales se transmiten a través del núcleo es aun casi dos veces mayor que la del sonido en acero. Las velocidades en el núcleo parecerían ser menores cerca de la periferia y aumentar considerablemente hacia el centro.

Podemos agregar que, según parece, el núcleo interno refleja pero no refracta las ondas transversales S. Aunque ello no es muy seguro, parecería que estas ondas no pueden propagarse a través del núcleo y esto tiene especial interés cuando intentamos formarnos idea acerca del estado físico de la materia en el interior de la Tierra.

Con estos datos Gutenberg llega a la conclusión de que la rigidez de los materiales aumenta con la profundidad. A pocos centenares de kilómetros la rigidez es igual a la del acero, entre 1000 y 1500 kilómetros es dos veces mayor y en el manto profundo, cerca ya del núcleo, alcanza a ser cuatro veces mayor que la del acero. Pero en el núcleo disminuye y disminuye tanto que, quizá, sea de un orden de magnitud comparable al de la "rigidez" de la goma.

Y bien. ¿En qué estado físico se encuentra la materia en el interior de la Tierra? La respuesta dependerá, en buena parte, de la definición que adoptemos para palabras tales como *flúido*, *líquido*, *sólido*, *rígido*, que se emplean más o menos arbitrariamente y con distinto significado según el criterio de cada cual.

Podríamos definir un líquido como una sustancia que reúna al mismo tiempo baja rigidez, baja viscosidad y escasa resistencia al flujo plástico y al esfuerzo de corte o "cizallamiento". Y con esta definición nada estaría "líquido" en el interior, ni aun el material del núcleo pese a su baja rigidez, ya que la enorme presión a la que está sometido, del orden de los 3.000.000 de atmósferas, nos está diciendo que su viscosidad debe ser elevada. Gutenberg sospecha atinadamente que para poder observar una deformación plástica de la materia en el núcleo deberíamos esperar quizá más de 100 años.

Si abandonamos el concepto de viscosidad en la definición de líquido, entonces el núcleo podría estar líquido y el resto manto y corteza, sólido. Pero entonces caerían dentro de la categoría de líquidos sustancias de escasa rigidez y alta viscosidad tales como ciertas ceras que fluyen lentamente bajo su propio peso.

Si por líquido entendemos aquellas sustancias sin forma propia que toman inmediatamente la del recipiente que las contiene — otra definición común de líquido —, entonces tampoco habría nada líquido en la Tierra.

El problema, pues, es por ahora irresoluble porque es un problema de definiciones, y hasta que una convención internacional no defina de una vez por todas estos términos y ponga un poco de orden en el caos, no sabremos como llamar realmente al estado en que se encuentra la materia en el interior de la Tierra. Decir que el manto es sólido porque transmite las ondas transversales es una petición de principio que entraña admitir que tales ondas no se propagan por los líquidos. Y en este caso el núcleo podría estar líquido, puesto que, en apariencia al menos, las ondas transversales no lo atraviesan.

Queda aun la posibilidad, sostenida hace poco por Kühn y Rittmann, de que el núcleo consista en "materia solar no diferenciada y ionizada", sometida a una temperatura del orden

de los 12.000 grados y bajo una presión de 3.000.000 de atmósferas. Y es evidente que nos resultará siempre muy difícil imaginar el estado físico de esta materia, comparándolo con los estados de la materia que conocemos en nuestros laboratorios.

Falta el último problema. El más difícil. El de la composición química de los materiales. Todos nuestros datos se refieren a propiedades físicas de la materia en el interior de la Tierra y poco nos dicen acerca de las sustancias que allí se encuentran. Aquí tenemos que proceder por inferencias y comparaciones, más o menos hipotéticas o afortunadas: la composición química de los meteoritos y los procesos metalúrgicos que ocurren en los hornos de fundición.

En lo que respecta a meteoritos partimos de la hipótesis de que representan fragmentos de un planeta del sistema solar, de composición similar a la de la Tierra, que fué despedazado en millones de trozos, quizá por fuerzas disruptoras de marea. El planeta estuvo ubicado entre Marte y Júpiter y hoy sus fragmentos forman un inmenso enjambre que gira alrededor del sol en órbitas individuales muy distintas. Son los "asteroides", algunos de los cuales como Apolo, Hermes y Adonis, tienen órbitas tan elípticas que alcanzan a pasar entre Venus y Mercurio. De cuando en cuando uno de estos fragmentos, en su vertiginosa carrera por los espacios interplanetarios, cae dentro de la acción gravitacional de la Tierra y si no se vaporiza completamente al ponerse incandescente atravesando la atmósfera, se estrella al fin contra la superficie. Estos son los "meteoritos".

Los hay de varios tipos que forman una especie de "serie" continua. Los más livianos, las *tektitas*, están formados por vidrio, casi idéntico a los vidrios volcánicos que arrojan muchos volcanes terrestres. Y estos representarían a la costra exterior del planeta desaparecido. Luego viene el conjunto de las *condritas* y *acondritas*, donde predominan silicatos de magnesio y de hierro y que, por su composición, serían comparables a los materiales que forman la parte externa del "manto" terrestre. Luego las *siderolitas* y *sideritas* en las cuales, a más de los silicatos mencionados hay óxido de hierro y hierro al estado nativo, que representarían las capas profundas del manto terrestre. Por último los meteoritos metálicos, compuestos casi

exclusivamente por hierro con algo de níquel y cobalto, que provendrían del núcleo del planeta despedazado y serían similares a los materiales que constituyen el núcleo de la Tierra. Esta hipótesis tiene el atractivo de explicarnos la distribución de la densidad en el interior de la Tierra y parece lógico admitir que si el núcleo está formado por hierro y níquel tenga, en conjunto, mucho mayor densidad que las rocas superficiales constituídas por silicatos livianos.

Perfecto. Pero no nos olvidemos que estamos apilando hipótesis sobre hipótesis y que al explicar los meteoritos como fragmentos de un planeta despedazado similar a la Tierra, estamos teorizando. Ciertamente descubrimientos muy recientes han robustecido esta idea, pero aun no está demostrada del todo. Hasta hace cosa de un año había un serio escollo para aceptarla: las "edades" muy dispares de los distintos meteoritos medidas con el "método del helio" que oscilaban entre 100 y 2.800 millones de años. Se hacía difícil aceptar entonces que los meteoritos pudieran representar fragmentos de un solo y mismo planeta. Estudios muy modernos, iniciados hace poco más de un año por Paneth y su escuela, han demostrado que estas "edades absolutas" eran erróneas y que tomando en cuenta el helio generado por los rayos cósmicos en los meteoritos (a más del generado por desintegración atómica del uranio), las edades verdaderas oscilan entre uno y diez millones de años. Estos son "primeros resultados" del nuevo cálculo y se cree que mediciones más precisas reducirán este margen de error. Parece, pues, que todos los meteoritos tienen la misma edad y que si en verdad representan fragmentos de un planeta, la explosión que lo despedazó ocurrió hace muy poco tiempo... geológicamente hablando.

Nos queda, finalmente, la famosa comparación de Goldschmidt entre la Tierra y un horno de fundición. En un horno se produce una verdadera estratificación de los materiales, cayendo al fondo el metal líquido más o menos puro. Arriba del metal queda una capa de sulfuros y, flotando sobre ella, las escorias formadas por silicatos. En un gran horno que contuviera una mezcla fundida similar en composición a la de la Tierra —dijo Goldschmidt—, caería al fondo la masa líquida de hierro y níquel y los silicatos se separarían de los

metales flotando como escoria. A medida que la escoria se enfriara, cristalizarían primero los silicatos de hierro y magnesio que tienen punto de fusión alto, e irían a reposar sobre la capa metálica. Lo último en cristalizar sería la parte más externa de la escoria, rica ahora en sílice, y ésta representaría la capa granítica más exterior de la corteza terrestre. Esta comparación, que en términos generales está basada de acuerdo con lo sugerido por los meteoritos, ha sido puesta en duda recientemente por van Bemmelen y otros geólogos. Y fuerza es confesar que es excesivamente empírica.

Este es el estado actual de nuestros conocimientos respecto a la constitución interna de la Tierra. Conocimientos por demás esquemáticos, borrosos e imprecisos. Pero peor es nada. ¿Cuánto de lo que he expuesto brevemente aquí quedará todavía en pie dentro de unos pocos años? No me atrevo a profetizarlo, pero me extrañaría mucho si se salvara más de la mitad.

III

TROMPOS, CATALINAS, MAREAS, CHOQUES,
REMOLINOS Y NUBES

Los filósofos antiguos aceptaron las cosas tal cual son y no se preocuparon en buscar un origen "racional" de la Tierra y del Universo. Y durante todo el Medioevo y hasta bien entrado el siglo XVIII, los pensadores occidentales se contentaron con aceptar a pie juntillas el génesis del relato bíblico.

Fué quizá Swedenborg el primero en romper fuego con una hipótesis cosmogónica de corte moderno. En el primer volumen de su "Opera Philosophica et Mineralia", aparecido en 1734, el filósofo sueco se adelantó a Kant y a Laplace al formular una hipótesis que postulaba una nebulosa inicial como progenitora de nuestro sistema planetario. Pero su explicación, así como la que expusiera Kant en su "Allgemeine Naturgeschichte und Theorie der Himmels" en 1775, pasó poco menos que desapercibida y la "hipótesis nebular" ha quedado estrechamente unida al nombre de Laplace.

Pierre Simon, Marqués de Laplace, uno de los más extraordinarios matemáticos de todos los tiempos, desarrolló independientemente la "hipótesis nebular" en 1796 en su "Exposition du Systeme du Monde", obra semipopular que alcanzó gran renombre y fama. Laplace no intentó un análisis riguroso de su hipótesis, que casi 80 años después fué investigada cuantitativamente por Roche y, más tarde, en 1894, por Faye, quien le introdujo algunas modificaciones importantes.

Hasta fines del siglo pasado la hipótesis de Laplace fué

aceptada por la mayoría de los astrónomos y de los geólogos, pero hace ya mucho tiempo que está definitivamente descartada. Y sin embargo no solamente hay todavía mucha gente que la admite, sino que ignora que existen otras teorías más modernas y más de acuerdo con nuestros conocimientos actuales. ¿Por qué razón misteriosa la imaginación popular se aferra tan fácilmente a ideas erróneas?

No deja de ser curioso el hecho de que la hipótesis haya encontrado inspiración en dos fenómenos aberrantes, en dos cosas de excepción: el hielo y los anillos de Saturno. Porque el hielo, ese hielo tan cotidiano y familiar que flota en la jarra de agua, en las charcas o en el mar es algo realmente excepcional. No debería flotar, debería hundirse. La inmensa mayoría de las sustancias conocidas son más densas en estado sólido que en el líquido. Un decímetro cúbico de roca sólida pesa más que un decímetro cúbico de la misma roca fundida. Pero el hielo, no. ¡Tan luego el hielo debía ser la excepción! ¡Tan luego la sustancia que más frecuentemente vemos en sus tres fases, sólida, líquida y gaseosa, debía ser la excepción! La naturaleza jugaba una mala pasada a los sabios del siglo XVIII que estaban muy lejos de sospechar lo excepcional que es el hielo a este respecto. Y los anillos de Saturno son excepción excepcionalísima. Son únicos. Y pocas dudas pueden haber acerca de que, pese a lo singular de los mismos, sugirieron la generalización Laplaciana.

En realidad Laplace nunca propuso una teoría "formal". La expuso en la "Nota VII y última", apenas 10 páginas de su libro, casi como un pasatiempo ingenioso, como una posibilidad elegante, como un juego del espíritu. Y el peso aplastante de la reputación de Laplace, cuyo genio dominó la matemática de todo un siglo, hizo que el pasatiempo se convirtiera en teoría y la teoría en dogma. Hasta que hace 50 ó 60 años, al intentarse un análisis severo de la hipótesis, todo se vino abajo con estrépito. Dogma y teoría se desinflaron y todo quedó como al principio: simple juego del espíritu, pasatiempo ingenioso, elegante y simétrico. Sobre todo simétrico.

Laplace comenzó con una catástrofe. El sol era, al principio, una estrella como tantas otras hasta que un día explotó expulsando parte de su materia hasta donde hoy se encuentran

las órbitas de los grandes planetas. "Esta explosión" — escribió Laplace —, "debería haber ocurrido por causas similares a la que produjo la brillante erupción de 1572, que duró varios meses, de la famosa estrella de la constelación de Casiopea". Estas explosiones, durante las cuales una estrella aumenta en brillantez 15 ó 20 magnitudes estelares expulsando una masa inmensa de materia, se llaman actualmente "novas" o "supernovas". Laplace, pues, hace comenzar la historia del sistema planetario con un sol que bruscamente se convierte en nova o supernova y queda envuelto en una inmensa esfera gaseosa más tenue. Esta es la "nebulosa inicial" de la hipótesis, nebulosa sometida al principio a elevadísima temperatura y dotada de un movimiento giratorio de rotación directa. Laplace no mencionó el tamaño que tendría al principio esta enorme bola de gas caliente, pero la hipótesis no tiene sentido sino admitimos que la nebulosa se extendía por lo menos hasta la órbita de los grandes planetas.

La nebulosa estaba limitada por la superficie en la cual la fuerza centrífuga equilibraba a la fuerza de la gravedad. Y el gas era en extremo tenue. Lord Kelvin calculó, a fines del siglo pasado, que la densidad media de la nebulosa, de haber tenido un radio 40 veces mayor que el de la órbita de la Tierra, hubiera sido 570.000.000 de veces menor que la del aire atmosférico a la temperatura de 10 grados, mientras que Moulton, años más tarde, calculó que si la nebulosa se hubiera extendido hasta la órbita de Neptuno, la densidad hubiera sido 240.000.000 de veces menor que la del aire en la superficie terrestre. Para llegar a estos cálculos no hay más que sumar toda la materia existente en el sol y en su familia de planetas y desparramarla uniformemente en una bola que, con centro en el sol actual, se extienda hasta la órbita de Neptuno o más allá, según el caso.

La hipótesis dice que la nebulosa, originada por la explosión, pierde calor por radiación y se enfría. Al enfriarse se contrae y al contraerse aumenta su velocidad de rotación. Las partículas situadas en los paralelos se acercan al centro pero en el ecuador la aceleración centrífuga se hace igual a la aceleración centrípeta de la gravedad. La porción ecuatorial rompe su cohesión con la nebulosa y se separa de ella formando un "anillo ecuatorial" que la nebulosa deja atrás al continuar con-

trayéndose por enfriamiento progresivo. Y así explica los anillos de Saturno... que hoy se explican de manera totalmente distinta y casi diríamos opuesta.

Al proseguir el enfriamiento aparecen nuevos anillos que se van desprendiendo sucesivamente y cada uno de ellos origina un planeta por evolución posterior. El anillo sería inestable y se rompería por sus puntos más débiles. Por algún proceso curioso e inexplicado la materia gaseosa se reuniría alrededor del núcleo y así, cada anillo, daría lugar a una nebulosa secundaria más pequeña que podría denominarse "nebulosa planetaria". Cada una de ellas y por igual proceso, originaría nuevos anillos que, por condensación final, darían nacimiento a los satélites. Los gases de las "nebulosas planetarias", al perder éstas calor por radiación y enfriarse progresivamente, comenzarían a condensarse en forma de gotas líquidas que caerían, por gravedad, hacia el centro de la masa originando finalmente un núcleo líquido rodeado por una atmósfera o envoltura gaseosa. Más tarde, al proseguir el enfriamiento, comenzaría el proceso de cristalización del núcleo líquido, originándose una corteza sólida mientras la parte central continuaba aún en estado flúido.

Y aquí es donde interviene el hielo. Esta parte final de la hipótesis, como bien señalara Hobbs, pudo ser imaginada y aceptada fácilmente porque se gestó en Europa, región donde en cada invierno se ve flotar el hielo sobre el agua de lagos y arroyos. Nadie sospechaba entonces lo excepcional que es el hielo a este respecto, y menos aún que las rocas son más densas en estado sólido que en fusión. Surgió así el concepto de "corteza terrestre", derivado de la hipótesis Laplaciana, de corteza sólida sobre un globo flúido, de cáscara primitiva originada por cristalización directa del material líquido interno. La idea, hoy descartada definitivamente, fué aceptada casi como axioma durante el siglo pasado y tuvo influencia nefasta en el desarrollo de la geología.

La hipótesis de Laplace, admitida durante mucho tiempo más por el renombre y fama de su autor que por su valor intrínseco, ha sido hoy abandonada luego de detenidos análisis que han demostrado su falacia. Quizá convenga mencio-

nar algunas de las muchas objeciones que se le han formulado varias de ellas insalvables.

Ya en 1859 Clerk-Maxwell señaló que los anillos que se separarían de la nebulosa durante su contracción no se condensarían en un cuerpo único sino que irían a formar un sinnúmero de cuerpos pequeños y darían origen a un enjambre de asteroides en vez de un planeta. Poco después Roche notó que la segregación de un anillo ecuatorial podría ocurrir solamente si toda la masa, menos una 600 avas parte, estuviera concentrada en un núcleo central. De otra manera el momento de inercia sería demasiado grande para que fuera posible alcanzar la velocidad de rotación requerida para que se segregara un anillo. Pero en 1917 Jeans demostró que la materia expulsada de la nebulosa podría condensarse solamente si la densidad media cerca de su periferia fuera comparable a la densidad media de toda la nebulosa, puesto que la densidad de la materia expulsada debe ser suficiente para permitir que la atracción gravitacional venza a la tendencia local de dispersión por rotación. Hay, pues, una contradicción evidente que, como bien dijera Jeffreys, "muestra que la génesis del sistema solar a partir de una nebulosa simétrica es imposible".

En 1929 Jeffreys demostró que también la "variante Faye" de la hipótesis (algo así como la variante Capablanca de la apertura Ruy Lope), que postula una nebulosa sin núcleo central más denso, conduce a la misma incongruencia.

Objeciones aun más importantes hizo Fouché en 1884 señalando las dificultades en materia de momento angular que entraña la hipótesis y Moulton, en 1900, demostró que si consideramos al sistema solar convertido en una nebulosa gaseosa expandida hasta abarcar la órbita de Neptuno y distribuimos en ella la densidad según las leyes de los gases, si esta nebulosa poseyera la totalidad del momento de momento que hoy posee el sistema solar, no tendría suficiente velocidad de rotación para segregar materia en el ecuador y, lo que es más aún, no adquiriría la velocidad necesaria para ello hasta no haberse contraído hasta bien adentro de la órbita de Mercurio. Peor aun, si se admitiera la hipótesis habría que aceptar que al separarse el "anillo de Júpiter", este anillo, que no alcanzaría a contener más que una milésima parte de la masa total de la nebulosa,

se llevó consigo el 95 por ciento del momento de momento total del esferoide gaseoso en rotación. Lo cual es prácticamente imposible de admitir.

Pensemos, además, que cuando Laplace formuló su hipótesis todos los planetas y satélites conocidos poseían movimiento "directo" de rotación y traslación. La primer anomalía fué hallada luego del descubrimiento de Urano por Herschel en 1781, ya que este planeta tiene movimiento rotatorio "retrógrado". Más tarde, en 1898, Pickering halló el primer caso de movimiento de traslación retrógrado al descubrir el satélite Febe de Saturno. En la actualidad sabemos que a más de Febe, tres satélites de Júpiter (los VIII, IX y XI), los cuatro de Urano (Ariel, Umbriel, Titania y Oberón) y el único de Neptuno, poseen movimiento retrógrado con lo cual son ya muchas las excepciones a la regla general del movimiento directo. Y, con la hipótesis de Laplace, estos movimientos retrógrados son inexplicables sin recurrir a hipótesis subsidiarias y "ad hoc".

En 1888 George Darwin sugirió una nueva hipótesis cosmogónica que ya había sido esbozada por Proctor en 1870. La hipótesis fué expuesta en mayor detalle por Lockyer en 1890 y por de Ligondes en 1897. Esta hipótesis, que ha dado en llamarse "meteorítica", se aparta de la de Laplace en suponer que la nebulosa primitiva estaba compuesta no por gases sino por un agregado de meteoritos. Pero como Jeffreys apuntara, la hipótesis presenta exactamente los mismos puntos débiles de la nebulosa y ha sido también abandonada.

A principios de siglo, See expuso una nueva teoría según la cual los planetas serían extraños al sistema solar y habrían sido captados por el sol en tiempos remotos. El sol, en ese entonces, habría tenido una atmósfera densa y debido a la resistencia de esta atmósfera los planetas acabarían por describir órbitas cada vez más circulares. La hipótesis tiene, en primer lugar, el inconveniente de que todos los planetas giran en un mismo sentido alrededor del sol y casi en un mismo plano. Pero, sobre todo, que no explica el origen de los planetas ni el mecanismo de su nacimiento antes de ser "capturados" por el sol.

A principios de siglo también, en 1901, Chamberlin y Jeans

desarrollaron independientemente y casi al mismo tiempo nuevas teorías que, si bien tienen un fondo común, se apartan casi *ab initio* al explicar la historia ulterior de la evolución del sistema solar. Estas hipótesis, que alcanzaron considerable crédito en su época, se conocen actualmente con el nombre de "hipótesis de mareas".

La de Chamberlin, expuesta por primera vez en 1901 y luego ampliada en 1906 y 1916, fué analizada matemáticamente por Moulton, quien colaboró estrechamente en su gestación. Por eso se la conoce hoy como "hipótesis de Chamberlin-Moulton", o, más frecuentemente, como "hipótesis planetesimal".

Para definirla con las mismas palabras de Chamberlin: "La hipótesis planetesimal asume que el sistema solar se derivó de una nebulosa del tipo más común, la espiral, y que la materia de esta nebulosa progenitora se hallaba en estado sólido o líquido finamente dividido, en armonía con los espectros continuos de las nebulosas espirales. Considera a los nudos de la nebulosa como núcleos de los futuros planetas y a la niebla nebular como materia a añadirse a estos núcleos para formar los planetas. Asume que tanto los nudos como las partículas de la niebla nebular se movían alrededor de la masa central en órbitas elípticas de considerable, pero no excesiva excentricidad. Postula un simple modo de origen de la nebulosa relacionado con el acontecimiento, no improbable, de la cercana aproximación del sol ancestral a otro gran cuerpo celeste, pero la hipótesis principal no depende de este postulado. Considera que el agrupamiento de los planetesimos es debido al cruzamiento de las órbitas elípticas en el transcurso de sus inevitables desplazamientos. De estos procesos desarrolla ideas consistentes en lo que respecta a la distribución de masa y momento, espaciamento de los planetas, sus densidades y otras peculiaridades. Deduce un crecimiento relativamente lento de la Tierra, con una temperatura interna en aumento desarrollada en la parte central y progresando hacia la periferia. Con tal manera de crecimiento de los estadios de la temprana historia de la Tierra necesariamente se apartan mucho de aquellos postulados por la hipótesis de Laplace y la meteorítica".

De acuerdo con la teoría planetesimal, la Tierra pasó por

períodos distintos y sucesivos desde el momento de su gestación embrionaria en el seno de la nebulosa espiral hasta el comienzo de las eras geológicas. Partimos de un "estadio nuclear", formando la Tierra un núcleo o nudo de la nebulosa. Este núcleo, constituido por agregación de planetésimos sólidos, tendría un diámetro inicial de unos 3.000 kilómetros. El núcleo inicial crece por adición de nuevos planetésimos y al llegar el planeta embrionario a un diámetro de unos 5.500 kilómetros, alcanza la masa suficiente como para retener una atmósfera. Muy tenue al principio, esta atmósfera proviene del material gaseoso ocluido en los planetésimos nucleares primitivos y también del contenido en los planetésimos agregados durante el crecimiento. Sigue luego el "estadio volcánico inicial". El cuerpo, creciendo a medida que nuevo material se añade a su superficie, se condensa progresivamente y esta compresión, originada por su propia gravedad, produce el calor suficiente para fundir las rocas a baja presión cuando el planeta tenía unos 6.500 kilómetros de diámetro. El calor nuclear tendía a migrar hacia la periferia más fría del planeta y se producía así una "fusión selectiva" de los materiales menos fusibles. Los glóbulos líquidos iniciales fueron agrandándose lentamente al aumentar la temperatura, uniéndose luego en bolsones cada vez mayores, que migraban poco a poco hacia la periferia sometida a menor presión. Los bolsones flúidos consiguieron finalmente insinuar lenguas en la zona fracturada cerca de la superficie y llegar por fin a la superficie misma, originándose así los primeros fenómenos volcánicos. Viene luego el "estadio hidrosférico inicial" cuando la Tierra, ya con tamaño comparable al de Marte, pudo retener en su atmósfera el vapor de agua. Cuando se alcanzó el punto de saturación el vapor se convirtió en agua que se condensó en innumerables lagos y lagunas que se fueron agrandando y colectando en cuencas mayores para formar los océanos. Sólo cuando la Tierra adquirió atmósfera considerable y una extensa hidrosfera se dieron las condiciones propicias para la existencia de la vida como la conocemos hoy y llegamos así al "estadio de vida inicial". Luego siguió el "estadio de crecimiento final" durante el cual la Tierra colectó prácticamente a todos los planetésimos de la nebulosa progenitora que cayeron bajo su in-

fluencia. Su crecimiento llegó a un máximo y quizá alcanzó un diámetro de 900 kilómetros mayor que el actual. El encojimiento posterior se achaca a la disminución de la porosidad primitiva ocasionada por los planetésimos granulados.

La "hipótesis planetesimal", quizá por haber sido propuesta por un geólogo — y uno de los eminentes —, tuvo aceptación considerable entre los geólogos. Pero pronto se acumularon numerosas objeciones en su contra que la hacen hoy muy improbable. Una de ellas, y no la menos importante, es el hecho de que las nebulosas espirales son enormemente mayores que el sistema solar. En realidad son "galaxias", "universos-mundos", otras tantas "vías lácteas" como la nuestra que contienen, cada una, 400 a 1.000 millones de estrellas comparables a nuestro sol. Y nunca se ha podido demostrar la existencia de una nebulosa espiral de tamaño solar. Si bien es cierto, pues, que este tipo de nebulosa es muy frecuente, hecho subrayado por Chamberlin, no es menos cierto que el orden de magnitud es millones de veces mayor que el de la nebulosa espiral que la hipótesis supone progenitora del sistema solar. Por otra parte la teoría no explica satisfactoriamente la composición de las atmósferas de los diversos planetas y, sobre todo, las diferencias observadas en lo que respecta a los porcentajes de hidrógeno y nitrógeno en los grandes planetas y en los llamados terrestres.

Casi al mismo tiempo que Chamberlin y Moulton, Jeans proponía otra "hipótesis de marea" que también postulaba dos estrellas progenitoras: el sol, entonces frío y opaco con radio comparable al de la órbita de Neptuno, y otra estrella que, al pasarle cerca, originó la emisión de un chorro de material gaseoso del sol debido a fuerzas de marea. Este material gaseoso dió origen a los planetas por condensación en núcleos separados. La hipótesis difiere, pues, de la de Chamberlin en el hecho de que la materia expulsada por el sol se considera gaseosa y no formada por un agregado de planetésimos, líquidos y sólidos.

Pero en 1749, casi 50 años antes que Laplace, Buffon expuso en el capítulo "Teoría de la Tierra" de su monumental "Historia Natural", una teoría según la cual los planetas y satélites provendrían de fragmentos desprendidos del sol a consecuencias del choque de algún "cometa". Si bien Buffon utilizó el

término "cometa" es evidente que, al pensar en tal choque, tenía en mente un cuerpo celeste de grandes proporciones y masa ponderable, más que un cometa en el sentido moderno de la palabra.

La idea de Buffon, olvidada por mas de un siglo debido al prestigio de la Laplaciana, fué exhumada por Bickerton en 1881 y luego modificada sustancialmente y analizada con rigor matemático por Jeffreys en 1929. Según Jeffreys el sistema planetario se habría originado no a consecuencia de una acción de marea por el pasaje de una estrella errante cerca del sol, sino por el choque real de la estrella con el sol. Con alarde de matemáticas y de ingenio saca Jeffreys las últimas conclusiones de este postulado y, al mismo tiempo, acumula objeciones contra la hipótesis planetesimal, declarándose partidario de un origen "catastrófico" y no lentamente evolutivo del sistema solar. Se aparta de Chamberlin y se acerca a Jeans al aceptar que la materia expelida del sol constituyó un filamento gaseoso que, por condensación en núcleos separados, dió origen a los diversos planetas y satélites del sistema. El filamento gaseoso surgido de una inmensa "protuberancia solar", tendría forma de cigarro y siendo inestable longitudinalmente se despedazaría en un rosario de masas separadas o "proto-planetas", las menores en los extremos y las mayores en la zona media. Cada "proto-planeta" se movería en órbita elíptica alrededor del sol y al sufrir la acción gravitacional del mismo en su primer perihelio, expelería parte de su masa originando los satélites.

Pero Russell, en 1935, objetó la hipótesis de Jeffreys aduciendo que la "teoría de colisión o choque" no provee suficiente momento angular para los planetas, objeción que viene a ser la inversa de la que se hace a la teoría de Laplace, que provee demasiado. De esta objeción de Russell surgió otra modificación de la "hipótesis de colisión", propuesta por Russell mismo e investigada analíticamente por Lyttleton en 1936.

Según esta nueva idea las dificultades desaparecerían si consideramos al primitivo sol no como estrella simple sino como "binaria", es decir, formada por dos estrellas que giraban alrededor de un centro de gravedad común, siendo la distancia entre ellas comparable al diámetro de la órbita de los grandes planetas. Dicho sea de paso, este tipo de estrella es bastante

frecuente en nuestra galaxia. Si una estrella errante chocó no con el sol sino con su compañera, el intercambio de momento entre la compañera y la errante dejaría a ambas con velocidades tales que las harían escapar de la influencia solar pero, sin embargo, gran parte de la materia expulsada durante el choque tendría velocidad menor que la de escape y quedaría con el sol, dando origen a los planetas. El sistema planetario, que de acuerdo a Laplace tenía un solo progenitor y de acuerdo a Chamberlin, Jeans y Jeffreys dos, tendría ahora, al estar con Russell y Lyttleton, tres progenitores.

También tendría tres padres (o madres) en una nueva hipótesis que Lyttleton propuso poco después pero, en este caso, no se trata ya de una estrella binaria y choque con una errante, sino de una estrella originariamente triple. El sol habría estado formado por una estrella principal y dos secundarias muy cercanas entre sí. El sistema sería inestable y se desintegraría en dos cuerpos que podrían escapar dejando sólo una pequeña parte de la materia con el sol y así se habrían originado los planetas.

Más recientemente aún, Hoyle propuso aún otra hipótesis "catastrófica", partiendo de una estrella binaria, pero sin choque. El sol habría sido un sistema binario y su compañera una inmensa estrella que se convirtió en "supernova". Como hemos apuntado ya, cuando una estrella se convierte en "supernova" su brillantez aumenta en pocos días en 15 ó 20 magnitudes estelares y, durante el breve lapso en que el astro se convierte en objeto brillantísimo, emite tanta energía como el sol en un millón de años. La materia es expulsada a temperaturas de millones de grados y en cantidades varias veces mayores que la masa del sol. Una pequeña asimetría en la explosión haría el efecto de un gigantesco motor a retropropulsión, a cohete, y la estrella escaparía de la acción gravitacional del sol dejando sólo parte de su materia expelida para formar los planetas.

Pero en los últimos tiempos todas estas hipótesis que postulan un origen catastrófico del sistema solar, es decir, por condensación directa del material gaseoso expelido súbitamente por el sol, han recibido un golpe mortal. Spitzer demostró, en 1939, que el chorro de materia gaseosa que el sol expulsa-

ría, ya fuera por acción de marea, ya por choque con una estrella errante, adquiriría en pocos minutos una velocidad fabulosa, de cientos de kilómetros por segundo, explotando finalmente y dispersándose en el espacio mucho antes de que pudiera comenzar cualquier proceso de condensación en materia líquida o sólida a consecuencia de la pérdida de calor por radiación. Se debe ello a que la temperatura del sol en la zona por sobre la cual existe material suficiente como para formar el sistema planetario, es del orden de los 10 millones de grados centígrados y que sólo la elevadísima intensidad de la gravedad, que atrae hacia el centro del sol a las partículas, permite que éstas continúen formando parte de él en vez de dispersarse en el espacio. Pero al originarse un filamento gaseoso como el postulado por Jeans o Jeffreys, la intensidad de la gravedad disminuiría enormemente en él, nada impediría la expansión y dispersión casi instantánea del material gaseoso.

Después de esta "explosión" introducida por Spitzer, hubo una pausa en la gestación de teorías cosmogónicas. Fué necesario reorganizar las ideas. Evidentemente las hipótesis catastróficas no servían y era necesario volver a las evolutivas. Y evidentemente también las hipótesis "dualistas", como así también las que postulan tres progenitores del sistema solar, debían descartarse puesto que todas tropezaban con la objeción de Spitzer. Y por ello las hipótesis más modernas, formuladas en los últimos años, han vuelto a hacerse "monistas" y admiten un único "padre" del sistema.

Un saludo, de pasada, a la teoría de Alfven. Hipótesis interesantísima, que se basa en la existencia de un campo magnético alrededor del sol que, según observaciones realizadas hace unos 30 años en el Observatorio de Mount Wilson, parecía existir realmente y tener una intensidad de unos 50 gauss. Pero observaciones muy modernas han demostrado que tal campo magnético no existe y, por lo tanto, la teoría de Alfven cae por su base. No entremos, pues, en detalles.

Hoy están de moda nuevamente las "hipótesis nebulares", pero en vez de pensarse en nebulosas del tipo Laplaciano o en espirales, se prefiere a las "nubes cósmicas" como las muchas que hoy se conocen en los espacios interestelares.

Von Weizsäcker fué el primero en formular, en 1944, una

hipótesis de este tipo, inspirándose en las ideas de Kant, publicadas en 1755. El sol primitivo se hallaba rodeado por una "atmósfera" rotatoria compuesta por átomos y partículas finísimas, cuya masa era 1/10 de la del sol actual. Esta "nube" estaba formada por 99 por ciento de hidrógeno y helio y 1 por ciento de elementos más pesados y cada partícula o átomo giraba alrededor del sol central en órbita separada. Von Weizsäcker discutió en detalle la mecánica de la condensación de una "nube cósmica" de este tipo. Los detalles son largos y complicados pero von Weizsäcker, y luego Haar quien prosiguió los estudios, demostraron que la envoltura del sol tomaría forma de disco con diámetro comparable al del sistema planetario actual. En este disco se producirían vórtices y remolinos de partículas gaseosas y sólidas y, en los remolinos, se originarían los planetas por condensación primero y luego, en la fase final del crecimiento, por captura gravitacional de nuevas partículas. Algo hay, pues, de "planetesimal" en la teoría.

Poco después, en 1946, Whipple propuso también una hipótesis "monista" partiendo de una nube cósmica similar a las nubes interestelares de nuestra galaxia, nubes que están formadas por gases y pequeñísimas partículas sólidas o líquidas. La nube debió tener un radio de unas 30.000 unidades astronómicas (la "unidad astronómica" es igual a la distancia media entre el sol y la Tierra) y una masa total poco mayor que la del sistema solar actual. Al contraerse la nube por propia gravitación el sol se fué condensando en la zona central mientras que los planetas se originaban en corrientes gaseosas a su alrededor.

La más nueva de las hipótesis cosmogónicas, formulada en 1950 por Urey, Brown y Latimer, postula también una "nube cósmica" inicial como la de Whipple. Nube "fría", sometida a temperatura de unos pocos centenares de grados Kelvin (que son grados centígrados pero con cero en cero absoluto, o sea en -273 grados centígrados) y formada por partículas sólidas y gases. El sol aparecería por condensación de la nube y al continuar el proceso, adquiriría un "satélite difuso" que luego se rompería en varias nubes menores, cada una de las cuales daría origen a uno de los planetas del sistema.

Como en el "filamento gaseoso" de Jeffreys, los planetas menores se habrían formado en los extremos y los mayores en la parte media.

La "nube cósmica" de la Tierra, según la hipótesis, tenía un diámetro original menor que la mitad de la distancia entre las órbitas de Venus y Marte y durante el proceso de su condensación, las partículas pesadas y especialmente las de hierro, se concentraron hacia el centro de la masa mientras ésta perdía su material gaseoso. La teoría dice que la Tierra se formó originariamente sin atmósfera y que al caer hacia el centro de la nube las partículas densas, se produjo una "diferenciación" por gravedad yendo al núcleo central las más pesadas (hierro y níquel), a las capas intermedias las de ortosilicatos y quedando en las zonas superficiales las basálticas. Luego, tanto en virtud de acciones químicas como debido al calor liberado por los elementos radioactivos, la masa condensada sufrió una elevación de temperatura que aun conserva. Parte del manto basáltico superficial se fundió y sufrió un proceso de diferenciación, descomponiéndose en granito, que ascendió para formar los bloques continentales, y en dunita, que tendió a hundirse. Los silicatos y aluminatos hidratados perdieron agua por acción del calor y ésta llegó a la superficie en forma de vapor, para condensarse luego. La atmósfera se originó por reacciones entre los óxidos de hierro y los carburos y por hidrólisis de los nitruros, que liberaron los gases que hoy la componen, a más de hidrógeno que se perdió lentamente por su bajo peso molecular.

A decir verdad ninguna de las hipótesis formuladas hasta la fecha es completamente satisfactoria, pero entre todas quizá la de von Weizsäcker sea la más aceptable en el estado actual de nuestros (escasos) conocimientos. Dicho sea de paso ésta es la única hipótesis que explica la curiosa distribución de los planetas en sus distancias al sol conocida como "ley de Bode".

IV

EL NACIMIENTO DE SELENE

Claro que no estamos nada de acuerdo al respecto, pero no importa. Nadie sabe cómo se ha originado nuestro más próximo vecino, la Luna, ni por qué goza la Tierra de tal excelente compañía pero, como es lógico, varias hipótesis se han formulado para explicar la existencia del satélite.

Empecemos por el principio. La Luna es mucho más chica que la Tierra. Su radio es sólo de 1.737 kilómetros y su volumen de 22×10^9 kilómetros cúbicos. Es decir que el radio terrestre es casi tres veces y media mayor que el lunar mientras que el volumen de nuestro planeta es casi 50 veces mayor que el de su satélite. La densidad de la Luna es también bastante menor que la de la tierra y alcanza sólo a 3,34 frente al valor 5,52 de la terrestre.

La Luna se encuentra hoy a unos 380.000 kilómetros de la Tierra y gira a su alrededor completando una vuelta entera en poco menos de 28 días. Y, notablemente, emplea el mismo tiempo en realizar un giro sobre su propio eje. Como consecuencia de esta coincidencia entre los períodos de rotación y traslación, la Luna nos muestra siempre la misma cara. Conocemos sólo un lado de nuestro satélite y la otra mitad, el otro hemisferio (en realidad un poquito menos), nos da siempre la espalda muy despreciativamente.

En el año 1880 Sir George Darwin, matemático de nota sobrino del gran Carlos, publicaba una serie de trabajos titulados "Sobre las mareas sólidas de esferoides viscosos y semi-

plásticos y las mareas oceánicas sobre un núcleo deformable". Título que, en apariencia, tiene muy poco que ver con la Luna y su origen. Pero si remontándonos en el pasado pensamos en una Tierra todavía líquida, nos damos cuenta que debía ser en aquella época un "esferoide viscoso y semiplástico" sobre el cual ejercería el sol efectos de marea como lo hace actualmente sobre los océanos. Y entonces el título comienza a tener algo que ver con el de este capítulo. En realidad encontramos en los trabajos de Darwin toda una teoría formal para explicar el origen de la Luna, teoría que ha dado en llamarse "de resonancia" y que culpa a la Tierra, con la ayuda del Sol, de la maternidad de su satélite. No se trata de un caso de partenogénesis. Sin la cooperación de Febo, Gea no hubiera dado a luz a Selene.

Hace 2.000 millones de años, quizá sólo 1.000 millones pero no menos, la Luna no existía. En aquel entonces Tierra y Luna formaban una sola y única masa y el planeta, algo más grande que el actual, estaba totalmente líquido y completaba un giro sobre sí mismo en cuatro horas en vez de hacerlo en 24 como la Tierra actualmente. El sol provocaba entonces, como ahora, mareas en la Tierra y el período de las mareas era de unas dos horas, es decir, la mitad del período de rotación. La Tierra, a consecuencia de las mareas, oscilaba de un lado y otro de su forma geométrica, distorsionándose su ecuador circular en una elipse. Y ocurrió que las fuerzas de mareas solares se sincronizaron con el período libre de vibración natural de la Tierra y debido a resonancia, es decir, al aumento de la extensión de la vibración cuando la fuerza externa tiene período igual al período natural, la amplitud de la oscilación siguió creciendo hasta hacerse muy grande. Lo mismo que ocurre cuando hacemos aumentar progresivamente la amplitud de las oscilaciones de un columpio al darle un pequeño empujoncito cada vez que pasa junto nuestro. Hasta que el chico se cae y se rompe una pierna.

Las oscilaciones continuaron en la Tierra lo suficiente como para que su amplitud se estabilizara y el planeta fué así deformado permanentemente. La deformación continuó creciendo en amplitud hasta que la masa, alargada como huevo esti-

rado apuntando al sol, se hizo inestable y se desprendió el extremo de la protuberancia. Y así nació la Luna.

Debido a la disipación friccional de la energía a consecuencia de mareas lunares y solares, el período de rotación de la Tierra se fué alargando hasta llegar al actual de 24 horas. Y la reacción de las mareas lunares en la Luna fué obligando al satélite a retroceder lentamente alejándose de la Tierra hasta su considerable distancia actual. Cuando nació estaba a unos 8.000 ó 10.000 kilómetros de la Tierra, quizá más pero no menos, y hoy día está a 380.000. Y sigue alejándose.

La teoría dice que el interior denso de la Tierra, en vez de ser atraído hacia el sol, fué deprimido y alejado de él y que el extremo de la protuberancia que dió origen a la Luna estaba formado por materiales provenientes de los mantos superiores del planeta. De allí la densidad relativamente baja de la Luna.

Todo se funda, pues, en el hecho de que la Tierra "primitiva" girara sobre sí misma en cosa de cuatro horas. ¿Es cierto? ¿Podemos demostrarlo? Veamos. La Luna está hoy a una distancia de la Tierra igual a 60,34 radios terrestres y gira a su alrededor en poco menos que 28 días. Admitamos que, al principio, Tierra y Luna formaban un único cuerpo y que el planeta, así acrecentado con la materia lunar, tenía un incremento de 1,25 % de la masa actual de la Tierra y de 0,4 % de su radio. Puede calcularse elementalísimamente, aplicando la "ley de conservación del momento de rotación" que cuando Tierra y Luna formaban un solo cuerpo, este debía girar sobre su eje seis veces más a prisa que la Tierra en la actualidad, o sea que completaba una rotación en cosa de cuatro horas. Y Sir George Darwin descubrió que el período libre de oscilación de esta Tierra "agrandada" sería de dos horas, coincidiendo con el período de las mareas provocadas por el sol y permitiendo, por ende, la resonancia.

Falta demostrar, para dar solidez a la teoría, que por efectos de marea la Luna se haya ido alejando de la Tierra al mismo tiempo que el planeta aminoraba su velocidad de rotación. Pues no tan sólo podemos demostrar que eso ocurre aun en la actualidad, sino que hasta podemos calcular el retardo que sufre la Tierra y la "velocidad de alejamiento" de la Luna.

Todo se debe, otra vez, a las mareas. Pero ahora a las mareas marítimas de mar. Hoy la Luna, como en el pasado, atrae hacia sí la masa de agua oceánica levantando dos olas en lados opuestos de la Tierra que tienden a seguir, en su movimiento, el de traslación de la Luna. Pero como el período de rotación de la Tierra es menor que el de traslación de la Luna, estas dos olas deben desplazarse a lo largo de la superficie de la Tierra completando una vuelta en 24 horas y de allí que, diariamente, haya dos "altas mareas" y dos "bajas mareas" en cualquier costa marina.. Las olas de marea, al desplazarse así, encuentran resistencia en las costas y especialmente en el fondo de los mares de escasa profundidad como el mar del Norte o la Bahía de Hudson. Y esta resistencia que encuentran las olas de marea actúa como freno sobre la rotación de la Tierra. El estudio minucioso de las mareas actuales permite asegurar que, por efecto de las mareas lunares, la velocidad de rotación de la Tierra disminuye de tal manera que cada 120.000 años la longitud del día se incrementa en la relación de un segundo.

Un segundo por día cada 120.000 años es poca cosa, pero la acumulación de las diferencias en unos pocos miles de años es apreciable. Con esta proporción allá por el año 2.000 antes de Cristo, es decir hace unos 4.000 años, el día era $1/30$ de segundo más corto que en la actualidad ($4.000/120.000$) lo que significa que el alargamiento "medio" del día desde entonces hasta la fecha ha sido de $1/60$ de segundo. Como en 4.000 años hay 1.460.000 días, el efecto acumulativo es igual a $1.460.000/60$, o sea 24.000 segundos. Y esto es poco más de seis horas y media. Por suerte existen observaciones astronómicas bastante exactas realizadas hace 4.000 años, y más aún, por egipcios, caldeos y chinos, que se refieren a las fechas de eclipses solares y lunares. Y calculando "hacia atrás" las fechas de estos eclipses en base de los precisos datos astronómicos que hoy se posee, se echa de ver que, con la presunción de longitud constante del día en los últimos 4.000 años existe discrepancias entre las fechas de observación y las calculadas, lo que prueba la realidad del efecto retardatorio de las mareas sobre la rotación de la Tierra.

Si aceptamos la proporción de variabilidad en la longitud del día como constante durante el larguísimo período que me-

día entre la actualidad y la fecha en que la Tierra-Luna giraba sobre sí misma en cuatro horas llegamos a la conclusión de que ese larguísimo período abarca unos 2×10^9 años, es decir 2.000 millones de años.

Y ahora, volviendo a la "ley de la conservación del momento de rotación" es evidente que si la velocidad de la Tierra empieza a decrecer poco a poco a causa de la Luna, la Luna no puede quedarse tan campante, sino que debe aumentar progresivamente su velocidad angular. Y este progresivo aumento, esta aceleración en el movimiento de traslación de la Luna tiene, forzosamente, que haberla obligado a alejarse más y más de la Tierra describiendo una órbita espiral, hasta llevarla a la respetable distancia actual. El cálculo exacto del alejamiento es complicadísimo pero lleva, admitiendo que la fricción de las mareas ha sido constante e igual a la actual, a suponer que tardó 4×10^9 años (4.000 millones de años) en llegar a su posición de hoy día, es decir al doble de lo calculado para la disminución de la velocidad de rotación de la Tierra.

Estos cálculos se basan, como hemos dicho, en admitir que, en épocas pasadas, el efecto de freno de las mareas lunares fué siempre el mismo que en la actualidad y tuvo valor constante. Pero esta presunción no puede ser cierta. Sabemos positivamente que la "acción de freno" de las mareas oceánicas actuales se debe casi exclusivamente a la resistencia que las olas de mareas encuentran en los mares poco profundos como el mar del Norte, el Amarillo y el de Behring. Depende, pues, de la extensión de estos mares someros ya que es evidente que cuanto más grandes, más resistencia ofrecerán a las olas de marea. Y los geólogos sabemos positivamente que, en muchas épocas pasadas, los mares someros han sido enormemente más extensos que en la actualidad. En el período Devónico, por ejemplo, hará cosa de 270 millones de años, el mar se extendía por sobre inmensas superficies de los actuales continentes. En Sud América solamente, cubría las cuencas del Amazonas, Paranaíba y Paraná, toda la faja de las llanuras "pre-andinas" desde Iquitos hasta Buenos Aires y toda la región Andina. Los mares que ocupaban las cuencas del Amazonas, Paranaíba y Paraná y los llanos pre-andinos debían tener en total más de seis millones de kilómetros cuadrados y sabemos a ciencia cierta que eran poco

profundos, comparables a este respecto al mar Amarillo actual o a la gran bahía de Hudson. La "acción de freno" de las mareas en aquella época debe haber sido mucho mayor que en la actualidad. Y entonces: ¡adiós posibilidad de cálculos exactos!

Por otra parte no sabemos cuando aparecieron los océanos sobre la Tierra. Y además, en las tempranas épocas que siguieron a la separación de la Luna, las mareas en la Tierra aún líquida, — y en su satélite recientemente desprendido —, debieron ser realmente formidables. Y el rozamiento producido por estas mareas debe haber originado un retardo paulatino de la velocidad de rotación de la Tierra y el consiguiente alejamiento de la Luna.

Todo eso induce a pensar que el tiempo necesario para llevar la Luna a su distancia actual es mucho menor que 4×10^9 años. Y se estima actualmente en la mitad, o sea 2.000 millones de años. Pero esta estimación es sospechosa: parecería que quisiéramos hacer coincidir el cálculo con el tiempo necesario para retardar la rotación de la Tierra de 4 a 24 horas. Y, además, porque conviene fechar el nacimiento de la Luna algo antes de la fecha de las rocas terrestres más antiguas conocidas hasta ahora, las de Karelia al Norte de Leningrado, que se formaron hace cosa de 1.850 millones de años.

La razón de esto último, — fechar el acontecimiento antes que la aparición de las primeras rocas —, es eludir una objeción que hiciera Jeffreys en 1929 a la teoría de la resonancia, afirmando que sólo sería posible el escape de la Luna si la Tierra, en aquel entonces, hubiera estado totalmente líquida. Según Jeffreys una corteza sólida, aun de pocos kilómetros de espesor, 20 ó 30 no más, hubiera sido suficiente para "desincronizar", por efecto de fricción las oscilaciones libres con las de marea, impidiendo así la resonancia. Y como hace 1.850 millones de años existían ya rocas sólidas, debemos ir más atrás para fechar el acontecimiento admitiendo que hace 2.000 millones la Tierra estaba enteramente líquida. Sin embargo, el efecto de una corteza sólida de poco espesor puede haber sido nulo y Sir Arthur Eddington, en 1924, afirmaba rotundamente que, con corteza o sin ella, la resonancia podía haber ocurrido y expresaba que si los geólogos no veían inconveniente

en la teoría, los astrónomos no tenían inconveniente en admitirla.

Pero la sombra negra de los geólogos no son los astrónomos, sino los geofísicos. Estos hijos que nos han salido saben mucha matemática y nos apabullan con fórmulas a las que, a menudo, hacen decir bastante más de lo que dicen. Véase sino. Jeffreys, que en un principio aceptara la "hipótesis de la resonancia" como una posibilidad *quasi* matemática y se divirtiera bastante introduciéndole modificaciones, la ha abandonado en 1952 como quien desprecia un guante viejo. Ahora señala que la teoría, en la forma de "resonancia pura", tal como fuera expuesta por Darwin, no es válida, ya que a medida que la amplitud de las vibraciones aumenta, amplificada por resonancia, "la energía disipada por la fricción interna aumenta como su cubo y aquella debida a las mareas sólo como su cuadrado, lo que parecería limitar la amplitud a unos 17 kilómetros". Tampoco sería válida la modificación propuesta por él mismo en 1939 de que por la gran velocidad de rotación, la masa flúida tomó forma de equilibrio piriforme, separándose luego en dos. Según sus nuevos cálculos, el momento cinético sería insuficiente para que ello ocurriera y la forma de equilibrio de la masa flúida sería siempre elipsoidal.

Pero a todo hay quién gane. Las objeciones de Jeffreys pueden, sin embargo, soslayarse con una nueva modificación de la teoría de la resonancia, propuesta por van Bemmelen en 1950. Esta modificación combina en realidad las ideas de Darwin sobre resonancia con las de Jeffreys sobre deformación permanente y las de Schwinner sobre explosión. Según van Bemmelen la expulsión de la Luna se debería a una combinación de resonancia, deformación y efecto de cohete. El extremo de la protuberación originada por las mareas solares habría sido finalmente expelido por una tremenda explosión de gases en su base, que lo expulsó de la Tierra como a un gigantesco "supercohete" más allá del "límite de Roche". Porque la Luna tiene que haberse originado más allá de este límite, que está a 2,4 radios terrestres de la Tierra, porque más acá las fuerzas de marea la hubieran despedazado en millones y millones de fragmentos que, distribuyéndose en un disco plano, hubieran ido a formar un anillo como el de Saturno.

Van Bemmelen, aprovechando las ideas de Kühn y Rittmann sobre constitución interna de la Tierra, ha explicado muy "modernamente" el escape de la protuberancia lunar convirtiéndola en un supercohetes. Según Kühn y Rittmann el núcleo terrestre actual estaría formado por "materia solar" en estado monoatómico y iónico, altamente comprimido y supercrítico, y a temperatura de unos 12.000 grados centígrados. Kronig, Boer y Korringa aceptan que, en estas condiciones, un buen 30 por ciento de la materia del núcleo podría estar constituida por hidrógeno. El núcleo estaría cubierto por un manto de compuestos bi-atómicos y este a su vez, por una corteza de más de 1.200 kilómetros de espesor formada por una mezcla de silicatos de moléculas pleo-atómicas. Y bien: según van Bemmelen el manto de silicatos tenía una porción externa altamente viscosa que, al enfriarse por conducción, impidió el libre intercambio entre los gases de la "atmósfera" y la masa fundida. Al bajar la temperatura de la envoltura gaseosa de la Tierra, se produjo una sobresaturación de constituyentes volátiles en la mezcla de silicatos y éstos se fueron acumulando en la base del manto exterior de 1.200 kilómetros de espesor, juntamente con grandes cantidades de hidrógeno provenientes del núcleo. En estas condiciones, las mareas provocadas por el sol en la Tierra y el acrecentamiento de su amplitud por resonancia produjo, al disminuir la presión en la base de la protuberancia, la acumulación progresiva de estos constituyentes volátiles entre los cuales figuraba el hidrógeno en buena proporción, hasta que finalmente los gases comenzaron a "espumar". La presión aumentó entonces enormemente y llegó el momento en que se produjo una tremenda explosión que originó la expulsión del extremo de la protuberancia, que salió escapada de la Tierra como un verdadero supercohetes hasta más allá del "límite de Roche". Luego, y por propia gravitación, este gran fragmento terrestre adquirió forma esférica y mientras el material expelido se colectaba en una bola y se enfriaba rápidamente, las últimas explosiones de gases originaron los múltiples cráteres que avejentan el cutis de nuestro satélite.

La idea de van Bemmelen no sólo es bonita y ultramoderna, sino que hasta hace a un lado con la objeción de que, para

un nacimiento de la Luna "por resonancia", la Tierra debió haber estado completamente líquida. Podemos admitir una corteza sólida de unos 20 ó 30 kilómetros de espesor sin que pase nada. Tal corteza no resistiría los esfuerzos de marea y se despedazaría en enormes bloques. Mucho antes de que, por efectos de fricción, hubiera sido capaz de "desincronizar" la resonancia, la acumulación de gases en la base de la protuberancia habría alcanzado el punto crítico de explosión dando origen al supercohetes lunar.

La teoría de Darwin-Jeffreys-van Bemmelen explica de manera sencilla la baja densidad de la Luna. Simplemente se debe a que nació de materiales terrestres ubicados entre la superficie y los 1.200 kilómetros de profundidad y que, por lo tanto, tenían menor densidad que la "media" del planeta.

Cabe preguntarnos todavía si este nacimiento "por gemación" de la Luna no dejó huellas en su progenitora. La respuesta se ofrece casi sola. No sé quién fué el primero que tuvo la idea de que el Océano Pacífico es la "cicatriz" dejada en la Tierra por la salida de la Luna pero Pickering, a principios de siglo, se refería a esta idea como "vieja". Si fuera así tendríamos la explicación (o una de las posibles explicaciones) de la curiosa asimetría de la superficie terrestre, con un hemisferio continental y otro "oceánico". Es que la Luna, al irse de la Tierra, se llevó consigo todo lo que había de "continental" en el hemisferio Pacífico, dejando un formidable boquete en el cual asoman (en el fondo oceánico) los materiales más densos del "substrato", el famoso *simá*.

¿Que si es cierto que la Luna se originó de esta manera y que el Océano Pacífico sea su "cicatriz"? No tengo la más vaga ni remota idea. Pero convengamos que *si non e vero e bene trovato*.

CORCHOS EN EL AGUA

Hasta mediados del siglo pasado se aceptó, sin mayores inquietudes, que las montañas se habían formado como arrugas al contraerse la Tierra y que si existían como grandes masas elevadas eran, simplemente, debido a la rigidez de la corteza terrestre que tenía suficiente resistencia como para soportar el peso sin deformarse. Y a esta rigidez de la corteza se atribuía, también, la existencia de continentes e islas elevadas sobre el fondo oceánico.

La cosa parecía tan obvia que nadie se había detenido a pensar si era cierta. Curioso es comprobar cómo esta idea simplicista fué abandonada a consecuencia de estudios realizados con fines totalmente ajenos al problema.

Mediaba el siglo pasado cuando, bajo la dirección de Sir George Everest (en cuyo honor lleva el Monte Everest tal nombre), el Servicio Trigonométrico de la India se abocaba a la tarea de medir una "red de triangulación" en aquel vasto subcontinente, con el propósito de establecer "puntos fijos" que sirvieran de base para confeccionar el futuro mapa de la India. Los "puntos fijos" se ubicaban por medio de mediciones geodésicas de alta precisión, utilizando el procedimiento usual de medir bases con cintas y alambres de aceros especiales y luego "cerrar triángulos de 20 ó 30 kilómetros de lado con teodolitos geodésicos. Se iba construyendo así una red de "puntos fijos", ubicados en los vértices de los triángulos con-

tiguos y se controlaba su ubicación por medio de observaciones astronómicas.

Es evidente que, si se conoce con exactitud la latitud y longitud geográfica de un punto cualquiera de la red, es fácil calcular las latitudes y longitudes de los demás, utilizando datos puramente geodésicos (es decir la dirección y la distancia entre punto y punto a lo largo de la superficie curva de la Tierra), pero pese a ello se controlaba la posición geográfica de cada "punto fijo" con observaciones astronómicas independientes.

Los trabajos progresaban de sur a norte, desde la India peninsular al Himalaya y todo anduvo bien hasta que, al cruzar la llanura del Ganges y aproximarse al pie de la gigantesca cordillera, comenzaron a aparecer "errores". La posición geográfica de ciertos puntos fijos, determinada por medición geodésica no concordaba con la posición obtenida por observación astronómica. Algo andaba mal. Se creyó en simples equivocaciones y se repitieron las mediciones. Y las discrepancias siguieron tan frescas. Por otra parte era evidente que los "errores" eran excesivos para achacarlos a verdaderos "errores de método". La explicación tenía que ser otra.

Por aquel entonces se sabía ya (Bouguer y La Condamine lo habían comprobado en el Chimborazo hacía mucho tiempo) que la mole de las montañas atrae a la plomada desviándolas de la verticalidad. Y como todas las determinaciones astronómicas de posición geográfica se basan en la plomada, que por un extremo apunta al centro de la Tierra y por el otro al zenit, es evidente que una desviación de la plomada, por pequeña que sea, ha de afectar a las determinaciones astronómicas de longitud y latitud. Cosa que, naturalmente, no ocurre con las determinaciones geodésicas. Allí, pues, debía encontrarse la razón de las discrepancias.

John Henry Pratt, sacerdote y matemático, Archidiácono que fuera de Calcuta, se interesó en el problema de estas "discrepancias" y en un breve artículo publicado en 1855 en el volumen CXLV de las "Philosophical Transactions" de la Real Sociedad de Londres, llegó a una sorprendente conclusión. El Himalaya atraía la plomada: ¡Pero no todo lo que debiera!

Pratt tomó en consideración dos de los "puntos fijos" de la

red de triangulación: Kalianpur y Kaliana. Kalianpur está situado más o menos en el centro de la península india mientras que Kaliana queda casi 600 kilómetros más al norte, en la llanura Indo-gangética al pie mismo del Himalaya. La "discrepancia" entre las observaciones eran aquí considerables. La diferencia en latitud, determinada geodésicamente por triangulación, era de $5^{\circ} 23' 42,294''$, mientras que la diferencia determinada astronómicamente era de $5^{\circ} 23' 37,058''$, con una "discrepancia" de 5,236". Y una "discrepancia" de 5,236 segundos de arco corresponde a una distancia de unos 165 metros, demasiado grande para explicarla por errores de método.

Pratt se puso a la tarea de calcular si esta discrepancia era debida a la atracción de la mole del Himalaya. En aquella época no existían mapas topográficos precisos de la gran cordillera, pero se tenían ya conocimientos suficientes acerca de la altura de sus cumbres y forma general como para llegar a una estimación bastante acertada de su volumen y de su masa. Y admitiendo, como hasta entonces se admitía, que la montaña constituía una "carga adicional" sobre la corteza terrestre, calculó cuál debería ser la atracción ejercida por la masa del Himalaya sobre la plomada, tanto en Kalianpur como en Kaliana. Con estas premisas halló que, en Kalianpur, la plomada debía haber sido desviada 11,968 segundos hacia el norte y, en Kaliana, 27,853 segundos. La diferencia, 15,885 segundos, resultaba más de tres veces mayor que la de 5,236 segundos hallada por Sir George Everest. La discrepancia entre los resultados del cálculo de Pratt y la cifra obtenida por el Servicio Trigonométrico era demasiado grande para achacarla a errores de triangulación o a errores en la estimación del volumen y masa del Himalaya. Solo cabía una conclusión: el Himalaya no atraía la plomada todo lo que debía. ¿Por qué?

Y aquí apareció George Bedell Airy, por aquel entonces Astrónomo Real de Gran Bretaña. En el mismo volumen de las "Philosophical Transactions" y pocas páginas luego del de Pratt, se encuentra un breve artículo de Airy donde, por primera vez, se ensaya una explicación de este fenómeno. Comienza Airy encomiando el trabajo de Pratt y confesando que la conclusión de que la atracción ejercida por la montaña es considerablemente mayor que la necesaria para explicar las ano-



El Himalaya atrae a la plomada

malías observadas le “sorprendió mucho al principio”. Pero añadiendo a renglón seguido que, sin embargo, a poco que se analice el problema, no sólo no hay nada sorprendente en la conclusión del archidiácono sino que, inclusive, ¡debió haber sido prevista! Y sin más ni más pasa, con una sangre fría estu- penda y como sin darse cuenta de lo monumental de la inno- vación, a expresar muy suelto de cuerpo que es imposible que la corteza terrestre resista el peso de los continentes y de las montañas.

Supongamos, dice Airy, que la corteza terrestre sólida tenga 10 millas (16 km.) de espesor. Para simplificar el pro- blema admitamos que, por debajo de esta corteza, todo el inte- rior de la Tierra está todavía líquido y formado por materia más densa que la de la corteza. A este material interno, y “para obviar circunlocuciones”, decide llamar *lava*. Supongamos, — continúa —, que la corteza sea perfectamente uniforme en todas partes, sin cuencas ni montañas, menos en una zona donde una protuberancia de 100 millas (160 km.) de lado sobresale 2 mil- llas (3,2 km.) del nivel superior de la misma. En este caso la base de la corteza sería perfectamente uniforme y su espesor sería de 10 millas en todas partes menos en la zona de la pro- tuberancia, donde aumentaría a 12 millas. “Afirmando” — dijo Airy —, que este estado de cosas es imposible. El peso de la protuberancia rompería la corteza y aquella se hundiría en la *lava*.”

¿Qué es lo que sucede “en realidad”? Pues muy sencillo. Lo que con un tronco que flota en el agua. Si la protuberan- cia se eleva 2 millas por sobre el nivel superior de la corteza, su base ha de hundirse también por debajo del nivel medio de la base de la corteza. La protuberancia *no puede* tener 12 millas de espesor sino bastante más. Cuanto más, es imposible de calcular por el momento, — añadió Airy —. No tenemos aún los datos suficientes para tal cálculo. Lo importante es que la corteza no resiste el peso de las montañas. Las cordilleras no se elevan sobre la corteza como una pila de libros sobre una mesa, sino que “flotan” como témpanos en el mar, como cor- chos en el agua. Cuando más sobresalga el témpano, más se hundirá su “raíz” bajo las aguas. Las montañas tienen “raíces”. Representan un espesamiento de la corteza terrestre, tanto

hacia arriba como hacia abajo. Es la única explicación posible.

“¿Así?”, — dijo Pratt —. Y tomando nuevamente la pluma escribió un segundo artículo, publicado también en el mismo volumen de las “Philosophical Transactions”. “¿La única ex- plicación? ¡Quíá!”. El Astrónomo Real, en un artículo publi- cado en las Transactions de 1885, sugiere que inmediatamente debajo de las masas de las montañas hay muy probablemente déficit de materia que produciría una especie de atracción negativa y de tal manera contrabalancearía el efecto de la plo- mada. Esta hipótesis parece, sin embargo, insostenible”. Y por tres razones. “Primero” — dijo estirando un dedo —, “porque la corteza sólida es mucho más espesa de lo que el Astrónomo Real supone. Segundo” — y estiró otro dedo —, “porque Mr. Airy supone que el material de la corteza es más liviano que el flúido interior, cuando lógicamente debe ser al revés. Y tercero” — y estiró otro dedo —, “porque siguiendo el mismo razonamiento deberíamos admitir que, en las cuencas oceáni- cas y en otras hoyadas, la corteza está adelgazada y no se alcanza a percibir la razón de tal adelgazamiento.”

Admitiendo, sin embargo, que la razón de las anomalías observadas se debe a una “deficiencia de materia” por debajo de las montañas, explicó la cosa de manera distinta. Airy supu- so que los materiales de la corteza tenían igual densidad en todas partes. Supongamos que este no sea el caso. Supongamos que los materiales que forman las montañas sean más livianos que los que constituyen el resto de los continentes y éstos, a su vez, más livianos que los materiales que yacen por debajo de las aguas oceánicas. El resultado sería igual. La superficie de los continentes se elevaría sobre los fondos oceánicos y las montañas sobre los continentes pero “abajo”, la superficie inferior de la corteza coincidiría en todas partes formando una “superficie de nivel” perfectamente uniforme.

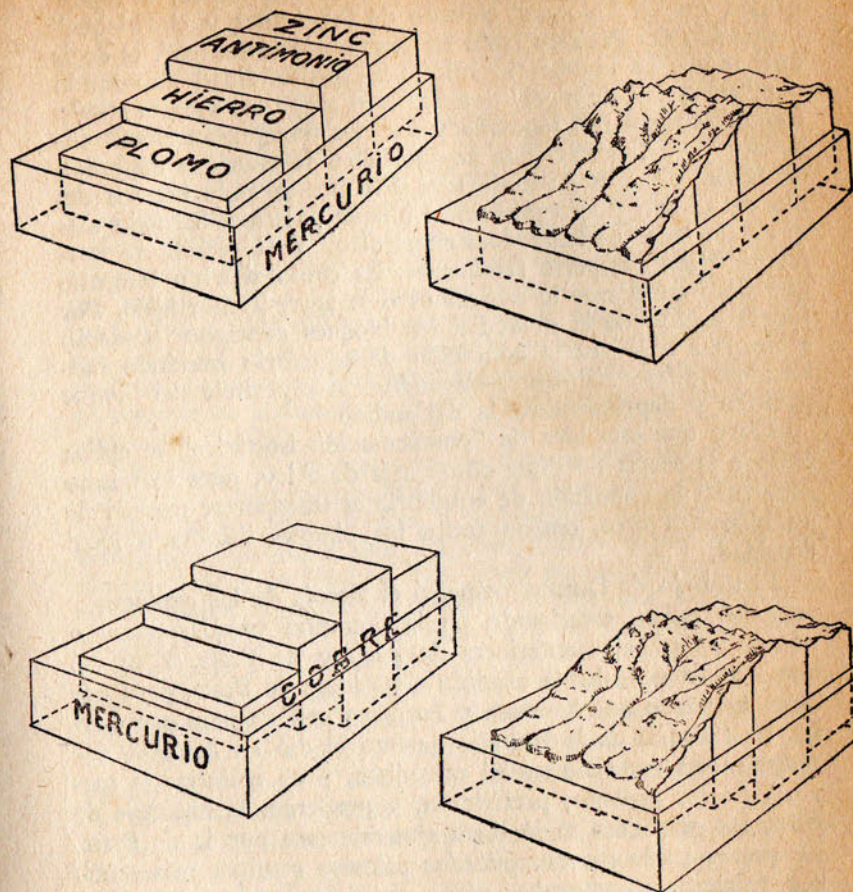
Para Airy, pues, la corteza estaría constituída por grandes bloques de igual densidad pero de distinta masa. Para Pratt, por bloques de distinta densidad pero de igual masa. Veamos. Tomemos en un primer caso cuatro prismas de cobre, de igual base pero de distinta longitud. Todos tendrán la misma den- sidad (8,9) pero su masa será distinta ya que su volumen tam- bién lo es. Hagámoslos flotar sobre mercurio, que tiene den- si-

dad de 13,6. El prisma más largo sobresaldrá más del líquido pero también se hundirá más. El más corto sobresaldrá menos y se hundirá menos. El más largo representa una montaña con su "raíz" hundida hacia abajo en el substrato infrapuesto a la corteza. Esta es la teoría de Airy, que ha dado en llamarse "teoría de las raíces de montaña". Tengamos ahora otros cuatro prismas, pero de materiales distintos: plomo (densidad 11,4), hierro (7,9), zinc (7,1) y antimonio (6,6). Si todos tienen igual base, para que todos tengan igual masa (volumen por densidad, el de plomo será más corto que el de hierro, éste más corto que el de zinc y éste, a su vez, más corto que el de antimonio. Hagámoslos flotar sobre mercurio. Veremos ahora que el de antimonio (el más largo) sobresale más y que el de plomo (el más corto) es el que sobresale menos. El más largo representa también a las montañas pero ahora las bases de todos los prismas se hunden exactamente lo mismo y se ubican en una "superficie de nivel" uniforme. No hay "raíces" en este caso. Las montañas sobresalen porque están hechas de materiales menos densos (o más livianos, que es lo mismo). Y éste es la teoría de Pratt.

Como a menudo acontece, los trabajos de Airy y de Pratt pasaron poco menos que desapercibidos y durmieron el sueño de los justos por más de un cuarto de siglo. Hasta que, en 1889, Clarence Edward Dutton, oficial del ejército norteamericano y geólogo por añadidura, llegó independientemente, y por caminos muy distintos, a una idea similar a la expuesta por Pratt. Y acuñó el término "isostasia" para denotar la condición de equilibrio de figura hacia la cual tiende un cuerpo planetario en razón de la fuerza de gravedad.

"Una Tierra isostática" —dijo Dutton—, "compuesta de materia homogénea y sin rotación, sería realmente esférica. Si rotara lentamente sería un esferoide de dos ejes. Pero si la Tierra no fuera homogénea, si algunas porciones cerca de la superficie fueran más livianas que otras, entonces la figura isostática no sería ya una esfera o un esferoide de revolución, sino una figura deformada, abultada allí donde la materia es más liviana y deprimida donde es más pesada." Esta es la idea de Pratt dicha de otra manera.

Supongamos ahora una montaña contigua al mar. Los An-



Por qué existen las montañas. (Arriba según Pratt y abajo según Airy.)

des, elevándose rápidamente desde la costa pacífica. Y supon- gamos, que el "bloque" elevado de los Andes y el "bloque" deprimido del Pacífico estén en "equilibrio isostático", es decir que ambos se hundan lo mismo en profundidad alcanzando una "superficie de nivel" común. Pero ahora los agentes atmos- féricos erosionan la montaña y los ríos transportan al mar los detritus que finalmente se acumulan en la contigua depresión oceánica. ¿Qué está sucediendo? Estamos sacando materia del bloque andino y agregándola al bloque pacífico. Sacando ma- sa de un lado y añadiéndola en el otro. Y el "equilibrio isos- tático" debe romperse fatalmente. Es como si a un témpano que flota en el mar le sacáramos o le agregáramos hielo. Por simple acción de la gravedad los bloques contiguos tenderán a alcanzar otra vez la condición de equilibrio isostático mo- viéndose diferencialmente, elevándose la superficie del bloque pacífico y deprimiéndose la del andino.

Claro que esta idea de "compensación isostática" se aplica tanto a la teoría de Pratt como a la de Airy, pues lo mismo rompemos la condición de equilibrio al transportar materia de un bloque a otro, tengan todos los bloques distinta o igual densidad.

El trabajo de Dutton despertó el interés de los geólogos y no faltó quien, escarbando en la literatura pasada, sacara a relucir los trabajos anteriores de Airy y de Pratt. Y se vió que Dutton nada había añadido a las ideas de Pratt, pero nos había brindado una hermosa y cufónica palabra para expresar- las. La "Teoría de la Isostasia", como se dió en llamarla, fué acogida con entusiasmo casi inmediato, pero mientras la ma- yoría de los geólogos prefirieron, y prefieren, la hipótesis de Airy, los geofísicos se inclinan generalmente por la de Pratt, ya que con ella sus complicados cálculos resultan más senci- llos. Curioso es comprobar cómo una de las teorías más fruc- tíferas e importantes de la geología moderna, fué elaborada por un clérigo, un astrónomo y un militar.

Sea ello como fuere, con Airy o con Pratt, se descartó casi de inmediato la idea simplista de que la corteza terrestre era capaz de mantener, por su rigidez, el peso de las montañas. Pocos fueron los geólogos que se opusieron a la nueva idea,

pero entre ellos figuró nada menos que Edward Suess, uno de los más grandes de todas las épocas.

En el último volumen de su monumental "La Faz de la Tierra", publicado a principio de siglo, Suess expuso sus ideas respecto a la constitución interna de la Tierra. Basándose en las especulaciones de Daubrée sobre los meteoritos, conside- rados como fragmentos de un planeta similar a la Tierra, Suess supuso que el núcleo terrestre debería estar formado por níquel y hierro como los meteoritos metálicos. De allí el nombre de "nife" (*ni*quel-*fe*rrum) que dió a este material. La envoltura del núcleo estaría formada por materiales caracterizados por una predominancia de silicatos de *magnesio*, y de allí el nom- bre de "sima" que dió a los materiales de este manto. Por últi- mo, las capas continentales apoyadas en el *sima* estarían cons- tituídas por materiales caracterizados por una preponderancia de silicatos de *aluminio*, y de allí "sial" (Suess le llamó origi- nariamente "sal").

Para Suess el *sial* era, pues, la corteza más exterior de la Tierra y se hallaba constituído por rocas comparativamente livianas, tales como granitos y sedimentos. Debajo de él se encontraban las capas altas del *sima*, formadas por rocas más densas, tales como basaltos. Pero Suess no sacó de esta concep- ción ninguna conclusión "isostática". Muy por el contrario, negaba la posibilidad de tal isostasia y en una frase un tanto irónica alude a la teoría diciendo que los autores norteameri- canos "no han creído menos que poder anunciar de una ma- nera formal que los Estados Unidos se mantienen a su altura sobre el mar no a consecuencia de la rigidez de la Tierra sino porque ellos flotan ("buoyed up, floated" aclara en inglés) en virtud de su baja densidad."

La idea de Suess fué de inmediato adoptada por la mayoría de los geólogos y geofísicos. Pero, naturalmente, adaptándola a la "Teoría de la Isostasia". Pese a que Suess la combatió, su *sial* y *sima* vinieron de perlas para robustecerla y hasta para combinar las ideas de Pratt con las de Airy. Los continentes, formados por *sial* liviano, se mantienen elevados sobre los fon- dos oceánicos porque flotan en el *sima* de mayor densidad, que asoma en las grandes cubetas oceánicas. Hasta aquí Pratt. Y las montañas sobresalen de los continentes porque allí el *sial*

está espesado y sus raíces se hunden en el *sima* subyacente. Y aquí Airy.

El concepto original de *sial* y *sima* se ha modificado bastante desde que Suess lo expusiera, pero aún se mantiene firme en nuestros días pese a que muchos geólogos y geofísicos tienen hoy una especie de alergia a las dos palabritas y prefieren sustituirlas por "materiales continentales" y "substrato" respectivamente. Que, sin duda, tiene la ventaja de no prejuzgar con respecto a la constitución química o mineralógica de los materiales en el interior de la Tierra, acerca de la cual todavía conocemos muy poco.

Claro que este "flotar" de los continentes sobre el substrato no es comparable al libre flotar de un corcho en el agua. En primer lugar la diferencia de densidad entre "materiales continentales" y "substrato" no es grande. En segundo lugar claro que el substrato no está líquido, sino sólido. Pero plástico. Algo así como el lacre, que se parte si lo doblamos bruscamente pero cede y se deforma bajo una presión continua menor que la necesaria para romperlo. Lógico, pues, que la "respuesta isostática" a cualquier ruptura de equilibrio, como la erosión de una montaña y la acumulación de sedimentos en una depresión oceánica, sea lenta y no casi instantánea como en el caso del sistema corcho-agua.

Tenemos en la actualidad un caso notable de "ajuste isostático" desarrollándose ante nuestros ojos. El de la península escandinava y Finlandia. Sabemos positivamente que Suecia, Noruega y Finlandia estuvieron íntegramente cubiertas por hielos continentales, tal como la Antártida o Groenlandia en la actualidad, y que la disipación de este hielo es moderna (desde el punto de vista geológico) y data de unos 7.000 años. El espesor medio del hielo en la Antártida es considerable y se lo estima en unos 1.500 metros. También era muy espeso en Suecia, Noruega y Finlandia, donde, con entera probabilidad, sobrepasó los 1.000 metros. Cuando esta gran región estaba cubierta por el hielo, soportaba una "carga adicional" y es evidente que, al derretirse y desaparecer la gran torta helada, al "quitar la carga", ha de haberse roto el equilibrio isostático. Toda la región debe tender a levantarse, elevándose su superficie ahora libre de hielos. Es como si a un corcho flotante le

colocáramos una piedrita y luego se la quitáramos. Al principio se hundirá un poco y luego, al retirar el peso, volverá a elevarse buscando su nueva "posición de equilibrio".

La península escandinava y Finlandia se elevan actualmente. Lo sabemos positivamente no sólo por el estudio de las costas antiguas, hoy elevadas sobre el mar y alejadas del mismo, sino por los datos de mareógrafos. El levantamiento continúa y en el golfo de Botnia alcanza a un máximo con casi un centímetro por año. El promedio durante los últimos 6.800 años, es de casi tres centímetros por año. La "respuesta isostática" ocurre aquí y ocurre, como era de prever, "retrasada" con respecto a la ruptura de equilibrio, debido a la alta viscosidad del substrato y a la escasa diferencia de densidad entre éste y los materiales de los bloques continentales. Pero lo importante es que ocurre y este hecho es casi suficiente como para traer la teoría de la Isostasia al campo de los hechos comprobados.

CUATRO SIGLOS Y MEDIO

La geología es ciencia moderna y puramente occidental. Ni griegos ni romanos sospecharon que la Tierra podía tener historia y la geología nada debe a los filósofos y pensadores "antiguos". No tuvo un Euclides como la geometría, ni un Arquímedes como la física y ni siquiera un Anaxágoras como la astronomía. Y si alguno, como Teofrasto, discurrió acerca de ciertos temas estrechamente vinculados con la geología, como el de las conchillas de moluscos halladas lejos del mar en las montañas, sus conclusiones, caprichosas y estrafularias, sirvieron sólo para confundir más los espíritus cuando, en los albores del siglo xvi, comenzó a despertarse el interés occidental por los fenómenos geológicos.

Fueron esas mismas conchillas de moluscos las que primero polarizaron la atención. ¿Qué eran esos restos, tan semejantes a los de seres marinos, que aparecían lejos de las costas y hasta encerrados dentro de las rocas en el interior de las montañas? Mala época la de comienzos del siglo xvi para plantearse pregunta semejante. La dialéctica escolástica subyugaba aún a los intelectos más preclaros y junto al culto casi místico por todo "lo antiguo" nacido en el Renacimiento, dominaban aún los prejuicios dogmáticos derivados de una interpretación literal y simplicista de las Sagradas Escrituras. No es de extrañarse, pues, que el solo planteo de tal pregunta condujese a una polémica vana y estéril que duró casi un siglo.

Algunos pensaban que aquellas conchillas eran simples "jue-

gos de la naturaleza" — *lusus naturae* —, mientras que otros achacaban su origen a la influencia de las estrellas o volvían los ojos a la "fuerza plástica" de Teofrasto, quien explicó tales "petrificaciones" como producto de una fuerza misteriosa latente en nuestra Tierra, capaz de convertir las piedras informes en remedos de formas orgánicas.

Se necesitó un genio de la talla de Leonardo da Vinci para despertar a la realidad que hoy nos parece tan obvia: aquellas conchillas no eran más que restos de moluscos que un día vivieron en el fondo del mar. Y poco después Fracastoro amplió el concepto y con clarísima argumentación demostraba que las conchillas en cuestión pertenecían a animales que habían vivido y muerto allí donde hoy las encontramos. Llevando aun más lejos el análisis Fracastoro negaba que la distribución de tales conchillas fuera obra del Diluvio Universal de Moisés, ya que si bien estas aguas "ante todo fluviales" hubieran podido desparramar los restos sobre la faz de la Tierra, mal hubieran podido enterrarlos en la profundidad de las montañas.

La luminosa exposición de Fracastoro debió haber cerrado el debate para siempre, pero se necesitaron casi 100 años de discusiones inútiles para darle la razón definitiva. Todo el siglo xvi se perdió en vanos esfuerzos y las polémicas — disputas escolásticas sobre teorías puramente imaginativas y fantásticas —, tuvieron a Italia como patria. Mattioli hablaba de una "materia grasa" que, fermentando por el calor, generaba los fósiles. Falloppio también creía en este curioso origen y explicaba los colmillos de elefantes hallados en Apulia como "concreciones de la tierra". Mercati volvía a la idea de las influencias astrales. Olivi de Cremona a la de los "juegos de la naturaleza" y Stelluti afirmaba que los fósiles no eran más que arcilla cambiada en forma orgánica por el influjo de aguas sulfurosas y calor subterráneo. Pero las ideas de Leonardo y Fracastoro se iban abriendo paso y los trabajos de Cardano, Cesalpino, Majoli, Imperati y Fabio Colonna terminaron por imponerlas definitivamente al cerrarse el siglo xvi.

Y sobrevino entonces otra disputa, igualmente enconada, que duró otros 150 años. Aceptado que las conchillas de moluscos eran restos de animales marinos, la discusión se polarizó en torno de las causas de su distribución actual. ¿Habían sido de-



*Reconstrucción de un unicornio hecha por Otto von Güricke,
en 1663, en base de huesos de mamut.*



Reconstrucción hecha por el autor de la de Otto von Güricke

jadas por el Diluvio Universal o este cataclismo no tenía nada que ver con tales restos? Y la discusión tomó, desde un principio, marcado sabor teológico y dogmático. Hasta los espíritus más elevados y los pensadores más agudos de la época tuvieron que luchar contra dos dogmas inapelables: el Diluvio Universal, que aparecía como única causa posible de los cambios habidos en la faz de la Tierra, y el tiempo extremadamente corto, apenas si 5.500 años, que se aceptaba como edad del planeta desde la "creación del mundo". Y como Lyell apuntara dos siglos más tarde, "nunca una falacia teórica, en ninguna rama de la ciencia, interfirió más seriamente con la observación precisa y la clasificación sistemática de los hechos".

Ya en 1517 Fracastoro opinaba en contra del Diluvio Universal como única causa de la distribución de las conchillas de moluscos en "tierra firme". Y en 1669 Steno, danés de nacimiento pero residente por muchos años en Florencia, mantenía que toda la Toscana había estado dos veces cubierta por el mar y había sido dos veces tierra firme. Distinguía ya entre terrenos formados por el mar y terrenos formados por la acción de los ríos y sostenía que todos estos estratos habían sido acumulados horizontalmente y luego dislocados por "escape de vapores" y "caídas en cavidades subterráneas". Steno expresó claramente lo que se ha dado en llamar "ley de la superposición estratigráfica" diciendo de dos estratos superpuestos que "cuando la capa más baja se acumuló no existía nada de la capa superior" o, en otras palabras, que la capa inferior es más antigua y se acumuló antes que la superior. En los escritos de Steno está en embrión la geología moderna, pero se necesitó un siglo y medio para dar la razón a este danés que ejercía en Florencia la profesión de médico.

Durante el siglo XVII y la primera mitad del XVIII el campo de batalla se generalizó a toda Europa y junto a los italianos entraron en la lid pensadores ingleses, alemanes, y franceses. En Inglaterra, donde la mayor parte de los cultores de la incipiente ciencia eran teólogos, se crearon múltiples "sistemas" teológico-físicos. Todo era "Teorías de la Tierra" y hasta algunas, como la de Burnet (1680) eran "Teorías Sagradas de la Tierra" donde la creación del mundo en seis días y el Diluvio Universal controlaban rígidamente al pensamiento. Hooke (1668) se enlistó

entre los que negaban que los fósiles marinos se debían al Diluvio de Noé, pero inventó, en cambio, una especie de diluvio propio, anterior al mosaico, durante el cual grandes terremotos hundieron y elevaron diferencialmente distintas zonas de la Tierra, permitiendo que el mar las invadiera o abandonara. Woodward (1695) volvió al Diluvio Universal y mantuvo que, durante el cataclismo, "todo el globo terráqueo fué disuelto en la inundación" y que los estratos "se decantaron de esta masa, separándose los sedimentos terrosos del fluido".

En Italia, Vallisneri (1721) y Moro (1740) se alzaron contra los absurdos sistemas físico-teológicos de las escuelas inglesas. Vallisneri, agudo observador que intentó un primer bosquejo de los depósitos marinos de Italia, dando su extensión geográfica y sus fósiles más característicos, señalaba como los intereses de la religión habían sufrido por mezclar permanentemente las Sagradas Escrituras con cuestiones de la ciencia física. Y se veía constreñido a combatir a San Jerónimo y otros exégetas, que sostenían que los manantiales surgían por sifones subterráneos desde el mar hacia arriba, perdiendo salinidad en su pasaje. Teoría ésta que se hacía descansar sobre el testimonio infalible de la Biblia, pese a que, naturalmente, la Biblia no es muy explícita al respecto.

Moro atribuyó a los terremotos y volcanes la aparición de los continentes pero, olvidando la admonición de Vallisneri, ajustó sus ideas al génesis mosaico: "Hasta el tercer día toda la Tierra estaba cubierta por agua dulce y cuando el Supremo Hacedor así lo dispuso, comenzaron las explosiones volcánicas que hicieron levantar masas montañosas por sobre las olas. Metales líquidos y sales ascendieron por fisuras y a consecuencia de tales exhalaciones volcánicas el mar fué adquiriendo su salinidad. Arenas y cenizas arrojadas por los volcanes se acumularon en el fondo de los océanos y formaron estratos secundarios, que luego se elevaron por efecto de terremotos". Como dijera poco más tarde Generelli, el ilustrador y divulgador de las ideas de Moro, el sistema explica todos los fenómenos "senza violenze, senza finzioni, senza supposti, senza miracoli". Las ideas modernas, que Hutton iba a desarrollar 50 años más tarde, están ya en esta frase de Generelli: "Por lo tanto creo justificado concluir que la misma causa que, en el comienzo de los tiempos,

elevó las montañas del abismo, ha continuado hasta el presente produciendo otras, para restaurar de tiempo en tiempo la pérdida de aquellas que se hundieron en diferentes lugares o fueron despedazadas o desintegradas de otra manera".

El caso de Buffon (1749) nos ilustra acerca de toda una época. En su "Historia Natural" mantenía que "las aguas del mar han producido las montañas y los valles de la tierra; las aguas del firmamento, desgastándolo todo hasta reducirlo a un plano, llevarán finalmente toda la tierra al mar y el mar, prevaleciendo sobre la tierra, dejará en seco nuevos continentes como los que habitamos hoy". La Facultad de Teología de París invitó muy cortesmente, en enero de 1751, a dar una "explicación" de estas ideas. Y Buffon no tuvo más remedio que aceptar el elegante eufemismo en un documento que comienza así: "Declaro que no tenía intención de contradecir el texto de las Escrituras; que creo firmemente todo lo que en ellas se relata acerca de la Creación, tanto en lo que se refiere al tiempo como a los hechos. Abandono todo lo que en mi libro se refiere a la formación de la Tierra y, en general, todo lo que pueda ser contrario a la narración de Moisés". Habían pasado 150 años desde que Galileo saliera mascullando "E' pur si muove..."

Pero, en el fondo, ya nadie creía seriamente en el Diluvio. Y vienen ahora los alemanes: Lehman (1756), Fuschel (1770), Werner (1775). Lehmann todavía encuentra sitio para el Diluvio, pero divide a las montañas en tres clases. Las primeras, formadas con el mundo y antes de la creación de los animales. Las segundas, originadas por destrucción parcial de las primeras a consecuencia de una revolución general. Las terceras, producto de revoluciones locales y, en parte, del Diluvio de Noé.

Fuschel distingue ya, en Alemania, varios grupos de estratos de distinta edad, cada uno caracterizado por fósiles propios. Y supone que Europa debió "haber estado cubierta por el mar y bordeada por tierra firme que luego fué lentamente invadida por el océano".

Con Werner se inicia la enseñanza de la geología en los institutos de altos estudios y la Escuela de Minas de Freyberg adquiere, en pocos años, reputación universal gracias al talento, la elocuencia y el entusiasmo de este hombre excepcional, que

fué el primero en aplicar los conocimientos geológicos a la práctica de la minería. Pero Werner no había salido de su Sajonia natal e intentó generalizar a todo el mundo lo que allí había visto e interpretado. Y este fué el origen de otra nueva disputa, que embanderó en dos campos a los primeros geólogos "de verdad".

Werner distinguió varias "formaciones" distintas y sostenía que cada una de ellas se había originado, en períodos sucesivos, de un "fluido caótico" que había cubierto la Tierra toda. El y sus discípulos intentaban demostrar que estas formaciones eran universales y que estas rocas, formadas todas en el seno de las aguas, se encontraban por igual en todas las regiones de la Tierra. La escuela de Freyberg era, pues, "neptunista": todas las rocas se habían formado en el mar, en el mítico reino de Neptuno. Y, en particular, afirmaba el origen "neptúnico" de los basaltos. En 1775 Werner había visitado el Stolpen, uno de los tantos cerros de Sajonia donde, reposando sobre sedimentos, aparecían rocas tenaces, de color casi negro, que desde hacía mucho tiempo se llamaban "basalto". Y en 1787 escribía que el cerro "no mostraba ni trazas de acción volcánica, ni la menor prueba de un origen volcánico", añadiendo que "luego de investigación y consideración más madurada, sostengo que ningún basalto es volcánico sino que todas estas rocas ...son de origen áqueo".

Frente a la escuela neptunista y a generalización tan categórica pronto se alzó la de los "plutonistas", que sostenían el origen volcánico de basaltos y rocas similares, venidas de lo profundo, del reino subterráneo de Plutón. Fueron los franceses, Dolomieu (1784), Montlosier (1788) y especialmente Desmarest (1763-1785), los propulsores de esta nueva idea que tuvo que luchar contra el enorme prestigio y la tremenda autoridad de Werner. Y fueron dos discípulos del propio Werner, D'Aubuisson y von Buch, quienes la impusieron definitivamente.

Desmarest había estudiado minuciosamente los basaltos de Auvergne en el centro de Francia. Había distinguido una por una las distintas masas de estas rocas y las había seguido hasta el pie de los cerros cónicos de Auvergne, que todavía conservan los rasgos distintivos de volcanes. Y había indicado las viejas coladas de lavas, convertidas luego en basaltos al enfriarse, en

un mapa notablemente preciso que, dicho sea de paso, es uno de los primeros mapas geológicos conocidos. Satisfecho con su obra y absolutamente seguro del origen volcánico de los basaltos, jamás quiso inmiscuirse en la polémica entre neptunistas y plutonistas y, quien le recababa una opinión, obtenía por toda respuesta: "Vaya usted a Auvergne y vea". Y sucedió que D'Aubuisson y von Buch, deseosos de demostrar el error de Desmarest, fueron. Y vieron. Vieron que Desmarest tenía razón y que el maestro, el gran Werner, era el equivocado. Apesadumbrados, pero con correcta probidad científica, publicaron sus observaciones, que hicieron mucho por derrumbar la teoría neptunista y, con ella, la reputación de Werner.

A los plutonistas se plegó Hutton, bien llamado el "padre de la geología moderna". El año 1788 marca un jalón en la historia de la ciencia: Hutton publica en Edinburgo su "Teoría de la Tierra", que luego elabora en 1795 y Playfair comenta en 1797.

En los escritos de Hutton (que dicho sea de paso están bastante mal escritos y son endemoniadamente oscuros) se expresa por primera vez en forma concreta que todos los cambios habidos en el pasado geológico pueden y deben explicarse recurriendo a agentes naturales y a las mismas fuerzas que actúan todavía. Pero más importante aún, Hutton expresa que "en la economía del mundo no puedo hallar vestigios de un comienzo ni indicación de un fin". Si todos los cambios ocurridos en la Tierra se deben al lento actuar de causas existentes hoy en día, entonces el tiempo, el tiempo transcurrido desde la aparición misma de la Tierra hasta la actualidad, debió ser muchísimo más largo de lo imaginado hasta entonces. Caído el dogma del Diluvio Universal, Hutton libera a la geología del "dogma del tiempo", del cortísimo lapso dentro del cual le había sido obligatorio explicar, hasta entonces, todos los cambios ocurridos en la faz del planeta desde la "creación del mundo".

Pero en la vieja Inglaterra, ajeno a las luchas entre neptunistas y plutonistas y a las polémicas entre las doctas escuelas de Freyberg y Edinburgo, trabajaba silenciosa y pacientemente un hombre de humilde origen, William Smith, quién debía convertir la geología en verdadera ciencia (o casi). Escasa fué la

enseñanza escolar que recibiera en sus primeros años pero su talento natural y sus dotes de observador agudísimo suplieron con creces esta deficiencia. (Lo que no constituye ejemplo muy edificante para los niños). Quiso la fortuna que a los 18 años, en 1787, un ingeniero le tomara como aprendiz y a poco conocía los secretos de su profesión tan bien como su principal. Desde 1791 a 1794 trabajó, ya independiente, en las minas de carbón de Somerset y, desde 1794 intervino en la construcción de canales navegables (había entonces una especie de manía por construir canales en toda Inglaterra) y ello le permitió realizar observaciones precisas sobre las características y extensión de las capas sedimentarias. Sus numerosos viajes le llevaron por toda Inglaterra, Escocia y Gales y, a lo que parece, ya en 1796 había realizado su descubrimiento trascendental: cada unidad estratigráfica, cada estrato individual, está caracterizado por un conjunto especial de restos orgánicos, de fósiles, que permiten individualizar cada capa y reconocerla en lugares distantes. Desde entonces su ambición consistió en desentrañar la sucesión estratigráfica de Gran Bretaña y, en 1815, coronó su obra publicando el famoso mapa titulado "Un bosquejo de los estratos de Inglaterra y Gales con parte de Escocia" donde, con distintos colores, indicaba los afloramientos de veinte formaciones geológicas diversas. Este es el prototipo de todos los mapas geológicos modernos.

El "descubrimiento" de Smith es la piedra angular sobre la cual reposa el edificio de la geología histórica y, en el apodo de "Strata" que le dieron sus contemporáneos, va implícito su reconocimiento como padre y creador de la estratigrafía.

Con Smith se cierra la era de las tonterías grandilocuentes y pseudocientíficas y la gente comienza a asentar cabeza. En el año 1807 se funda la Sociedad Geológica de Londres y unos 15 años más tarde, la dirección de la novel sociedad pasa a manos de un grupo de hombres de mucho mayor envergadura que los fundadores, hombres del calibre de Buckland, De la Beche, Sedgwick, Murchison y Lyell. Cansados los espíritus de polémicas inútiles, todo el mundo decide deponer las armas y empuñarse en realizar observaciones y acopiar datos antes de lanzarse a teorías fantásticas y temerarias. Y los miembros de la nueva sociedad acumulan rápidamente una inmensa masa de

“hechos observacionales” a los que se suman, desde 1830, los aportados por los miembros de la Sociedad Geológica de Francia.

1830 es fecha histórica en la geología. Señala el año de la primer edición de los “Principios de Geología” de Lyell donde el autor expone su famosa “teoría uniformitaria”. Lo que Generelli vislumbra, lo que Hutton expresara con su “actualismo”, Lyell expande al máximo desarrollando una teoría formal y rigurosa: todos los acontecimientos del pasado geológico no son sino el producto del lento actuar de causas actuales, de agentes y fuerzas que operan hoy en día y que antaño operaron con intensidad y ritmo similar y, por ello, “uniforme”.

Las ediciones de los “Principios de Geología” se sucedieron rápidamente hasta cristalizar en la famosa undécima edición de 1872. Y durante mucho tiempo y aun hoy, la “teoría uniformitaria” dominó el pensamiento geológico. La consecuencia más importante de la teoría fué conducir a los geólogos a estudiar lo que ocurre en la actualidad para poder explicar lo ocurrido en el pasado. Para entender cabalmente como pudo acumularse una arena en el mar, en una duna o en el lecho de un río, es necesario observar y analizar como se acumulan en la actualidad las arenas marinas, eólicas y fluviales. Para entender cabalmente el proceso formativo de una roca volcánica antigua, es necesario estudiar los volcanes actuales. Para interpretar correctamente los depósitos dejados por los hielos que un día cubrieron grandes partes de Europa y Norteamérica, y la erosión que produjeron, es necesario estudiar los glaciares actuales, analizar la erosión que están causando, estudiar como transportan los materiales detríticos y como los acumulan allí donde el hielo finalmente se licúa.

Por sobre toda otra consideración, pues, el “Uniformitarismo” de Lyell tuvo la importancia fundamental de promover el estudio y la investigación de lo que podría llamarse “geología del presente”. Pero cabe la pregunta: Si el “Actualismo” de Hutton es cierto, admitiendo que los procesos actuales son los mismos que operaron en el pasado: ¿El “Uniformitarismo” de Lyell es también cierto, en el sentido de que operaron con intensidad y ritmo semejante al actual?

El levantamiento de una gran cordillera como los Alpes, los

Andes o el Himalaya: ¿fué obra de un lento proceso, consecuencia de una sucesión espaciada de terremotos relativamente débiles como los actuales o fué originado en un lapso relativamente corto durante el cual sismos mucho más violentos que los de hoy día se sucedían con breves intervalos? ¿No existieron, en ciertas épocas pasadas, volcanes mucho más numerosos que los actuales y sus erupciones no fueron mucho más violentas y frecuentes? ¿En ninguna época los vientos y las tormentas del pasado sobrepasaron la violencia de las actuales? ¿No hubo largos períodos de quietud, de reposo tectónico, durante los cuales casi no se registraron terremotos en toda la Tierra y estos largos períodos no alternaron con otros más breves, caracterizados por violentas convulsiones de la corteza? ¿No pasó la Tierra por “edades de hielo” y por largos períodos durante los cuales no hubo hielo? Sí. El Uniformitarismo es una posición demasiado extrema y, filosóficamente, no hay relación entre “uniformidad” de los procesos y “uniformidad” de sus intensidades. El “Uniformitarismo” es, como Sollas, mi viejo profesor de Oxford dijera hace ya medio siglo, un “dogma indemostrable y no un principio científico”.

Pero hay algo más. Cuando Hutton dijo que no podía hallar “vestigios de un comienzo” (milagro hubiera sido haberlo hallado) no intentó decir que las mismas causas que actúan hoy en la Tierra han operado *siempre*, desde que existe el Universo. Lyell debió percibir claramente que al llevar a extremos el “Actualismo” del maestro, la teoría uniformitaria debía perderse en incongruencias si nos remontamos demasiado en el pasado. Y por eso su geología no se interesa en hipótesis cosmogónicas y se contenta con aceptar la Tierra tal cual es. Difícil hubiera sido explicar, con teorías uniformitarias, los cambios acaecidos en nuestro planeta desde su aparición como astro independiente, no importa cual de los múltiples teorías cosmogónicas aceptáramos como la más plausible.

Es que la Tierra no es algo muerto y estático sino organismo vivo, dinámico. Y como todo organismo ha de cumplir un ciclo vital inexorable que, desde el nacimiento, lleva a la juventud, la madurez, la ancianidad y la muerte. Como todo organismo es algo que se transforma, muda, evoluciona.

No había publicado Lyell la primera edición de sus “Prin-

cipios", cuando aparecían en Francia los escritos de Geoffroy de Saint Hilaire y la "Filosofía Zoológica" de Lamark. Y, con ellos, las teorías biológicas evolutivas. Mediaba el siglo pasado cuando Wallace y Darwin daban a conocer sus ideas transformistas en Inglaterra. Lo que Lamark no consiguiera con su obra, que pasó poco menos que desapercibida, lo consigue Darwin con su "Origen de las Especies", que tuvo repercusión mundial casi instantánea. Las teorías evolucionistas, creadas para explicar la aparición de las especies actuales de animales, se extendieron rápidamente a la paleontología, a los seres que vivieron en el pasado, e invadieron bien pronto la geología, que terminó por hacerse ella misma "evolucionista".

Con el "evolucionismo" las cosmologías han vuelto a la geología. Y es natural y lógico que así sea. Lo que ocurre hoy en la superficie de la Tierra y lo que ocurrió en el pasado "geológico", es consecuencia de algo que pasó en tiempos aun más remotos, la inevitable consecuencia de un origen determinado del planeta y de su ulterior evolución. No podemos entender cabalmente la mentalidad de un hombre, sus acciones, impulsos, sentimientos, pasiones, sin conocer su historia formativa el medio ambiente en el cual creció y todo aquello que contribuyó a modelar su personalidad. Y cuando nos remontamos en el pasado "pre-geológico" siguiendo una cualquiera de las hipótesis cosmogónicas modernas, pronto nos damos cuenta que el "Uniformitarismo" no es sólo un dogma indemostrable, como dijera Sollas, sino también erróneo.

Claro que todos somos más o menos "uniformitaristas" (o mejor dicho "actualistas") cuando intentamos explicar los acontecimientos acaecidos en la superficie de la Tierra durante los últimos 500 millones de años. Pero a medida que retrocedemos más en el tiempo, nuestro uniformitarismo (y hasta nuestro actualismo) se nos hace cada vez más incierto, más inseguro, más dudoso y finalmente termina por desaparecer allí donde decimos adiós a las rocas más antiguas que conocemos. Desde allí "para atrás" no hay "actualismo" que valga.

VII

Y LLEGARON LAS LLUVIAS

¿Qué fué ese Diluvio Universal que tanto preocupó a los pensadores del siglo xvi y del xvii?

Todos conocemos el relato bíblico: la lluvia torrencial que duró cuarenta días y cuarenta noches, el arca de Noé, la Tierra toda cubierta por las aguas y el desembarco en el monte Sinaí.

Debe haber llovido de manera realmente torrencial. Que yo sepa nadie ha intentado investigar cuánto llovió, pero un cálculo sencillo demuestra que si las aguas cubrieron toda la superficie de la Tierra (el monte Everest tiene unos 8.800 metros de altura), la cantidad de agua llovida debió alcanzar la fantástica cifra de 5.400.000.000 de kilómetros cúbicos. Volumen casi cuatro veces mayor que el de toda el agua actual contenida en todos los mares y océanos del presente, que alcanza sólo a unos 1.370.323.000 kilómetros cúbicos.

En los "cuarenta días y cuarenta noches" la precipitación total fué de 8.543.000 milímetros, es decir que llovió a razón de 8.898 milímetros por hora. Esto significa que el nivel de las aguas, en toda la superficie de la Tierra y tanto en los continentes como en el mar, subía a razón de unos 9 metros por hora o 15 centímetros por minuto. Más rápidamente de lo que sube el agua en una bañera cuando abrimos los grifos pensando en un baño de inmersión.

Cabe preguntarnos qué se hizo luego de toda esa agua: ¿Dónde se fué? ¿Adónde se escurrió para dejar la tierra "enjuta y seca"? ¿Al mar? ¿Pero si todo era mar!

Podría ser que la lluvia haya sido cuestión secundaria —acordémonos que también “fueron rotas las fuentes del abismo” —, y que en realidad pasó que el fondo de los océanos se elevó y el mar invadió los continentes. Pero así y todo, nos faltan unos 2.500.000.000 de kilómetros cúbicos de agua. Aunque el fondo del mar se hubiera elevado hasta casi sobresalir, no hubiera alcanzado el agua para cubrir toda la Tierra. Enormes cordilleras continuarían emergidas y no hubiera necesitado Noé un arca para salvarse con la “menagerie”. No. Evidentemente la lluvia debe haber sido considerable y la tormenta algo más que simple ornato pirotécnico.

Admitamos que los procesos, lluvia e inundación, son los mismos que actúan en la actualidad. Y admitamos también que éste puede ser uno de los casos donde fracasa el “uniformitarismo” y donde, en épocas pasadas, los procesos de hoy actuaron con mucha mayor energía e intensidad. Sí. Pero no tanto.

En primer lugar ya hemos visto que no nos alcanza el agua. En segundo lugar no hay ni el más leve rastro de semejante catástrofe universal. Quien haya tenido oportunidad de observar los efectos de una “salida de mar”, del desbordamiento de un gran río, de la caída de un dique, de una inundación local o de una corta y brusca lluvia torrencial en regiones semiáridas, podrá imaginarse cuáles debieron ser los efectos de tal “diluvio universal” y cuáles las huellas tremendas que hubiera dejado sobre toda la faz de la Tierra. Máxime cuando no hace tanto que ocurrió: apenas si unos 6.000 años.

Porque hoy caben ya muy pocas dudas que el diluvio “bíblico” realmente ocurrió, y ocurrió unos 4.000 años antes de nuestra Era. Pero lejos de ser “universal” fué una catástrofe local, o más probablemente varias, que afectó a aquella región de la baja Mesopotamia que, desde el golfo Pérsico, se extiende por las llanuras del Eufrates y el Tigris.

Por aquel entonces, en plena prehistoria sumeria, existían ya las antiquísimas ciudades de Erech, Kish, Awan, Ur, no lejos del Eufrates y del golfo. Y es evidente que estas regiones bajas fueron asoladas por una, y quizá por varias inundaciones catastróficas que dejaron profundas huellas en el espíritu de los sobrevivientes. Y el relato de las catástrofes, transmitido oralmente de generación en generación, adornado y “embellecido”

con el pasar de los siglos, vino por fin a incorporarse al conjunto de las “leyendas de Guilgamesh”, el mitológico héroe y semidiós de la Erech “prediluviana”.

Doce, como los signos del Zodíaco, son los cantos del gran poema épico de Guilgamesh y en el undécimo se encuentra lo que ha dado en llamarse “relato babilónico (o caldeo) del diluvio”, cuando debió decirse “sumerio”. Con el invento de la escritura cuneiforme, que hoy sabemos nació en la vieja Sumer del bajo Eufrates, se fijó la tradición oral y el poema alcanzó “forma literaria” quizá entre el 3.000 y el 2.500 antes de nuestra Era, poco más o menos cuando Sargon de Agadé se lanzaba a conquistar “el mundo”. Algunas inscripciones de esa época, escritas en el idioma turanio de los sumerios, atestiguan la antigüedad del poema al referirse a diversas aventuras de Guilgamesh. Pero el texto que conocemos hoy es moderno, si por “moderna” entendemos la época de Assurbanipal, que reinó en Nínive entre el 668 y el 626 antes de Cristo.

Las excavaciones realizadas durante la segunda mitad del siglo pasado por Layard, luego por Loftus, Ross y Rassam bajo la dirección de Rawlinson y más tarde por George Smith, en los montículos de Kuyûnjik y Nabi Yunis — la antigua Níniveh de los asirios —, dieron por resultado el hallazgo de miles de “tabletas” y “ladrillos” de barro endurecido con inscripciones cuneiformes. Era la biblioteca real, o mejor “ladrilloteca”, del palacio de Assurbanipal y la mayoría de estos viejos “libros de arcilla” eran copias o traducciones al asirio, ejecutadas por orden del propio Assurbanipal, de textos mucho más antiguos que, por aquel entonces, se conservaban en las bibliotecas de Babilonia, Akad, Ur, Erech, Larsam, Nippur...

Entre ellos se encontraron los que narran el poema de Guilgamesh. Hay varias copias de la épica gesta, copias más o menos bien conservadas y que ofrecen algunas variantes de detalle. Desde los trabajos de Smith publicados entre 1873 y 1876 hasta nuestros días, diversos asiriólogos las han “transliterado” y traducido. Hoy se lee el asirio de distinta manera que hace 60 años y muchos nombres sumerios se transliteran de modo diferente. Entre ellos el del héroe mismo, Guilgamesh, que los asiriólogos del siglo pasado transliteraban “Iz-du-bar” o “Gish-tu-bar” y

el de su "antepasado" Uta-napishtim (o Uta-natispun), que antes se leía 'Hasis-Adra o Sitnapistim.

Y bien. Dice el canto undécimo del poema cómo Guilgamesh, apenado por la muerte de su amigo Enkidu (que dicho sea de paso era un monstruo mitad hombre y mitad toro con el cuerpo cubierto de pelo largo y sedoso) y no queriendo correr igual suerte, decidió salir en busca de su "antepasado" Uta-napishtim, de quien se decía que había aprendido el secreto de la inmortalidad. Y fué Guilgamesh hacia la Montaña del Sol Poniente y luego de disputar con el Hombre-Escorpión y de convencer a Siduri (que no sabemos bien si era princesa o tabernera) y de cruzar las Aguas de la Muerte en la barca del piloto Ur-Shanabi, llegó por fin al lugar donde vivía Uta-napishtim "junto a la desembocadura de los ríos". Parecería que Guilgamesh, en su peregrinación hacia el oeste hubiera llegado al bajo Egipto donde reinaba, por aquel entonces, el "Escorpión", último de los reyes predinásticos del delta.

Encontrado que hubo al viejo Uta-napishtim le pidió, sin muchos preámbulos, que le iniciara en el secreto de la inmortalidad, a lo que su antepasado respondió que nada podía hacer en su obsequio puesto que "mientras se siga construyendo casas, mientras sigan peleando los hermanos, mientras perdure el odio en la Tierra, mientras sigan las aguas de los ríos corriendo al mar, así seguirá siempre la muerte llegando a todo hombre". Guilgamesh no era de quedarse con respuestas evasivas por más poéticas que fuesen y preguntó al viejo cómo era entonces que él había obtenido la vida inmortal de que gozaba "en la asamblea de los dioses". Y, en respuesta, Uta-napishtim relata la historia del diluvio:

"La ciudad de Shurippak, la ciudad que, como tú
sabes, está situada (a orillas) del Eufrates
esta (ciudad) era (ya) muy vieja, cuando los dioses
"llevados por su cólera, produjeron un diluvio"...

O, para estar con otra versión:

"Era una ciudad a orillas del Eufrates
"lamada Shurippak, protegida por los dioses.
"Vieja era la ciudad.



Guilgamesh y su amigo Enkidu

“Con siete veces siete vasos hice libación
 “y quemé cañas, cedro y madera de mirtos.
 “Y los dioses percibieron el olor del humo
 “y vinieron como moscas alrededor del fuego.”

Y es notable que Jehová, cuando Noé hiciera idéntico sacrificio, también aspirara con deleite el olor del humo.

Claro que Enlil se puso furibundo al saber que Uta-napishtim había escapado ileso de la destrucción total que proyectara y Ea lo pasó bastante mal cuando se supo que él había sido el culpable. Pero se excusó diciendo que no había razón para que pagaran justos por pecadores, que Uta-napishtim era un varón virtuoso y que era injusto hacerle pagar culpas ajenas. Ishtar, que como buena mujer todavía estaba bastante asustada, vino en su ayuda y Enlil quedó finalmente tan convencido que de *motu proprio* decidió regalar a Uta-napishtim con el don de la inmortalidad y, tomándole de un brazo, le sacó del país de Nizir y le depositó “junto a la desembocadura de los ríos”.

Y bien. ¿Qué fué lo que pasó? ¿Qué fué, en realidad, este “diluvio” que asoló la Mesopotamia desde el golfo Pérsico hasta el borde de la vieja Asiria?

La fe sincera y cándida del siglo XVII había dado paso, mediando el XIX, al descreído positivismo científico que se expandía pujante, consciente de su fuerza y seguro de su éxito. Las investigaciones históricas, arqueológicas, etnográficas, lingüísticas y el progreso de la geología invitaban a una explicación “racional” del diluvio mesopotámico y quedó reservado a Edward Suess, uno de los más grandes geólogos de todas las épocas, intentar una especie de “exégesis científica” del relato de Uta-napishtim. El primer capítulo de su obra monumental “La Faz de la Tierra”, aparecido hace ya sesenta años, se titula “El Diluvio” y allí, con persuasiva argumentación “racionaliza” la catástrofe y la convierte en algo natural y hasta plausible.

El fenómeno fué, para Suess, originado por un gran terremoto que afectó a la baja Mesopotamia, acompañado por un ciclón venido del Océano Indico. Interpretando las imágenes literarias del relato, Suess se pregunta si la advertencia de Ea, el dios marino, no consistió en pequeñas “salidas de mar”, en

“olas de marea” lanzadas sobre las costas bajas del golfo Pérsico por terremotos débiles que preanunciaban la catástrofe. Y oye en la “voz” admonitoria los sordos ruidos subterráneos, los “brontides”, que acompañan a los terremotos. Luego el sismo catastrófico. La propagación de las ondas por la llanura mesopotámica, provoca la surgencia del agua subterránea al producir grietas y rajaduras en el terreno y al compactar los sedimentos porosos del subsuelo embebidos en agua. Y éstas fueron “las fuentes de la tierra” que se abrieron. Llega bien luego el viento huracanado del ciclón, soplando hacia el noroeste desde el golfo Pérsico y, al atajar el agua de los canales que corren hacia el sureste, provoca su desborde. Luego la tromba marina, el “tifón” con su lluvia torrencial, su oscuridad casi absoluta, levantando una muralla de agua, una ola gigantesca, más alta a medida que se estrangula el golfo Pérsico, que invade finalmente la Mesopotamia y se lanza tierra adentro por la llanura del Eufrates y el Tigris. Olas semejantes, aunque no tan devastadoras, han asolado en tiempos históricos las costas de la India.

¿Hasta dónde llegó la inundación? ¿Dónde quedaba el “país de Nizir”? ¿Dnde encalló la barca? Suess ha demostrado, de manera elegante y convincente, basándose en una inscripción asiria que relata una expedición de Assurnazirpal al país de Nizir, que éste se encontraba al oriente del Tigris, más allá del Pequeño Zab y entre las latitudes de 35 y 36 grados. Es la región separada de la llanura del Tigris por las colinas de Karatchok Dagh, de Baravan Dagh y la parte septentrional de Djebel Hamrin. Estamos a unos 700 kilómetros al noroeste del golfo Pérsico, bien “tierra adentro” y en plena Asiria. Es evidente que la barca remontó el curso del Tigris y que en vez de ser llevada por aguas fluviales hacia el sureste, fué empujada en sentido inverso, desde el golfo Pérsico hacia el noroeste, por aguas marinas ayudadas por un ciclón venido del Océano Indico.

Pero las montañas que bordean al “país de Nizir” tienen unos 300 metros de altura y Suess se resiste a admitir que la inundación pueda haberlas cubierto. Es que la descreída ciencia positiva del siglo pasado fué demasiado lejos al intentar traducir las poéticas frases del mito mesopotámico en términos geológicos y meteorológicos. Ya Sollas esbozó una sonrisa, luego de verter al inglés la obra de Suess.

En las interpretaciones más modernas del poema de Guilgamesh no existen ya referencias, directas o veladas, a terremotos y hoy se admite que las traducciones del siglo pasado eran erróneas a este respecto. Nos queda, pues, sólo el ciclón, el "tifón" venido desde el golfo Pérsico inundando la llanura mesopotámica. Pero Bagdad sobre el Tigris, a 500 kilómetros del golfo Pérsico, está situada a 50 metros sobre el nivel del mar. Más al norte, allí donde el río Diyala, tributario izquierdo del Tigris, deja las colinas de Hamrin, su lecho se encuentra a 95 ó 100 metros sobre el mar. Y más al norte aún, en el "país de Nizir", las vaguadas de los ríos están entre 200 y 230 metros sobre el mar. Aun aceptando que hace 6.000 años la costa del golfo Pérsico hubiera estado 100 kilómetros al norte de la actual, es imposible admitir que una ola venida desde el golfo Pérsico se haya adentrado 600 kilómetros en la Mesopotamia y haya alcanzado a cubrir regiones situadas a 200 metros sobre el nivel del mar.

La alternativa, como Sollas señalara, es sencillísima. Consiste en admitir que el relato mesopotámico del diluvio es simplemente una "grosera exageración". Y eso es todo lo que se necesita para "reducir la catástrofe a proporciones corrientes y normales". Al fin y al cabo debemos reconocer alguna exageración en aquello de que "el diluvio se hinchó y llegó hasta el cielo", aterrando a los dioses que se refugiaban en la celeste cueva de Anú...

¿Por qué hemos de aceptar al pie de la letra el diluvio de Utanapishtim y esforzarnos en interpretarlo científicamente y, al mismo tiempo, considerar los relatos de los otros once cantos del poema de Guilgamesh como leyendas mitológicas? Porque a nadie se le ha ocurrido ver en ellos el reflejo de hechos históricos y el diluvio de Utanapishtim es tan científicamente improbable como el monstruoso Enkidu. Los doce cantos del poema relatan, en su conjunto, hazañas tan similares a los doce trabajos de Hércules que pocas dudas pueden haber ya acerca del origen mesopotámico de la leyenda griega de Herakles. El centauro Chirón es el monstruo Enkidu, el tirano Gyrón es el sumerio Humbaba, el toro de Creta tiene su contraparte en el que enviara Anú, a pedido de Ishtar, contra Guilgamesh y el león de Nemea es el que Enkidu llevó consigo contra el

héroe antes de convertirse en su amigo dilecto. Hasta el jardín de las Hespérides se reconoce en el parque de los dioses. Y nadie, hasta la fecha, ha intentado explicar "científicamente" los doce trabajos de Hércules.

Admitamos, pues, que el relato del diluvio sumerio, tal como nos ha llegado en las traducciones asirias del tiempo de Assurbanipal, es la narración literaria y "embellecida" de tradiciones antiquísimas que perpetuaron el recuerdo de una o varias inundaciones catastróficas que asolaron la baja Mesopotamia. Las excavaciones de Lagson y Wooley, realizadas hace unos 25 años en las ruinas de las viejas ciudades de Ur y Kish cerca del Eufrates, demostraron de manera inequívoca que ambas ciudades fueron totalmente destruidas por inundaciones y luego reedificadas en el mismo sitio sobre los escombros de las anteriores. Y que estas inundaciones tuvieron lugar allá por el año 4.000 antes de Cristo.

Ur. Ur de los caldeos. Allí nació Abraham, hijo de Terah y de allí emigró con su familia. "Y tomó Terah a Abraham su hijo, y a Lot hijo de Aran, hijo de su hijo, y a Sarai su nuera, muger de Abraham su hijo: y salió con ellos de Ur de los Chaldeos, para ir a la tierra de Chanaan; y vinieron hasta Haran y asentaron allí". (Génesis, XI, 31).

Hacia ya un milenio que los nómades semitas, pastores de vacas y cabras, se habían infiltrado en la baja Mesopotamia yendo a ocupar primero los taludes de los canales, las landas semidesiertas y las regiones pantanosas. Eran los "habiru", los "cabezas negras" como les llamaban los rapados sumerios de las ciudades. Poco a poco se habían hecho sedentarios y habitaban ciudades que más tarde sojuzgaron a las viejas poblaciones sumerias, pero todavía quedaban muchos pastores-nómades irreductibles, algo así como los gitanos de hoy en día, acampados en tiendas primitivas junto a las puertas de las ciudades populosas. De estos últimos era la tribu de Abraham, pero el contacto prolongado con los sumerios de Ur había hecho que estos "habiru" (hebreos) olvidaran su primitiva religión monoteísta y adoraran a los ídolos de Ur. Terah, padre de Abraham, era inclusive fabricante de ídolos, como lo dicen las tradiciones cristianas y judaicas. Pero Abraham parece que mantenía aún puro el culto al dios tribal de los hebreos, Ilu o El (Elohim es

plural mayestático de El y Yave (Jehová) se deriva de Ilu, como el Alá de Mahôma).

Posiblemente la emigración de Terah y su familia no fué voluntaria sino que obedeció a presión de los reyes de Ur, molestos y alarmados ante el poder creciente de los ricos "habiru" acampados a sus puertas. Y esto ocurría hacia el año 2.123 antes de Cristo, cuando Hammurabi (el Amraphel, rey de Senaar, del Génesis XVI, 1) reinaba en Babilonia y cuando el faraón Senjkere Mentuhotpe se ajustaba la tambaleante corona roja del Alto Egipto. Sin duda tanto Abraham como su familia conocían muy bien la mitología sumeria y el famoso poema épico de Guilgamesh. De allí la similitud notable entre el mito de Uta-napishtim y el de Noé, similitud que, a veces, llega a coincidencia de detalle.

La última versión mesopotámica del diluvio se debe a Berossos, sacerdote babilónico que vivió entre 320 y 260 antes de Cristo. Como Manetho en Egipto, nos ha dejado largas listas de reyes sumerios, akadios babilónicos, asirios y caldeos y una relación del diluvio que nos ha llegado fragmentaria. Los escritos de Berossos se han perdido y sólo conocemos algunos pasajes citados en las obras de Alejandro Polyhistor, Apolodoro y Abydeno. El diluvio de Berossos es casi idéntico al de Guilgamesh pero aquí el Noé no es Uta-napishtim sino Xisuthros (= Jasis Atra), legendario rey de Larak, hijo de Otiartes. Y es Cronos, en vez de Ea, quien le anuncia en un sueño la catástrofe que se avecina y le instruye en materia de construcciones navales. El cambio de personajes y de lugar responde a evidentes necesidades regionalistas, pero el mito es idéntico.

Pero las tradiciones diluviales no son patrimonio exclusivo de los mesopotámicos y de los semitas. Muy por el contrario, casi todos los pueblos de la tierra conservan tradiciones similares, que no son más que recuerdos de inundaciones catastróficas ocurridas en tiempos lejanos. Así, en los libros sagrados de los hindúes, y tanto en el Rig-Veda como en los más recientes, se encuentra varios relatos de "diluvios". En el Bâgharata-Pûrana, Vishnú predice a Satya-Vrata el diluvio que ha de ocurrir y en el Rig-Veda es Manu-Vâivasvata quien encalla con su barca en una de las cumbres del Himalaya. Pero es evidente

que estas narraciones de los Vedas no son más que versiones hindúes del diluvio de Uta-napishtim, tal como la narración bíblica no es más que una versión semita.

Los chinos conservaban la tradición de tremendas inundaciones ocurridas alrededor del 2357 antes de nuestra Era, en tiempos del Emperador Yâo. Los detalles se relatan en el "Schû-King" o "Libros de los Documentos Históricos" y, a lo que parece, se trata de una gran inundación del Río Hoang-Ho que, en tiempos históricos ha causado tales estragos, que con justicia se le llama "El azote de China".

En Egipto existían tradiciones semejantes. Y no podía ser menos, con un río como el Nilo. Pero la leyenda egipcia es bien distinta de la mesopotámica. En el capítulo 70 del "Libro de los Muertos" según el Papiros de Ani conservado en el Museo Británico, se cuenta como Temú, el dios-hombre, encolerizado con la humanidad decidió borrarla del mapa con una inundación del Nilo, volcando en él las aguas de Nú, el océano primordial. La creciente comenzó en Henensú (la Khânês de Isaías XXX, 4 y la Herakleópolis de los griegos) y pronto inundó "todo Egipto", salvándose sólo los que, con Temú, se refugiaron en la barca del dios-sol. La leyenda debe ser antiquísima y conserva el recuerdo de una creciente extraordinaria que afectó al bajo Egipto (y no a "todo Egipto") ya que Herakleópolis estaba situada a unos 100 kilómetros aguas arriba del Cairo actual. No se trata aquí de un diluvio con tempestad y lluvia como el sumerio-hebreo, sino de una inundación como las del Hoang-Ho en China.

Los indígenas sudamericanos tenían también tradiciones comparables a la china y la egipcia. Y las leyendas tupís y guaraníes hablan del "Padre de las Aguas" —el Amazonas o el Paraná—, desbordándose hasta cubrir toda la tierra mientras un inmenso chorro, surgiendo de una calabaza mágica, alimentaba la inundación.

Curioso nos resulta ahora contemplar los esfuerzos que se hicieron en épocas pasadas para documentar la realidad y la universalidad del diluvio bíblico. El más acabado intento fué, quizá, el "Tratado del Diluvio" de Catcott, publicado en 1761, donde, apelando a las tradiciones de las Indias Orientales, China

y América, hace el autor denodados esfuerzos por comprobar su tesis. Claro que olvidando el requisito fundamental de demostrar que todas estas tradiciones locales se refieren a un solo y mismo "diluvio".

VIII

HACIENDO ROCAS "UNIFORMITARIAS"

El "Actualismo" de Hutton es poco más que una simple afirmación de que las leyes naturales, químicas y físicas, son inmutables. Y el "Uniformitarismo" de Lyell, consiste en combinar esta verdad apriorística con una generalización intuitiva y dogmática. Eso de que "el presente es la clave del pasado" es muy bonito, pero tan cierto como que "el pasado es la clave del presente".

Tengamos una roca cualquiera, arenisca por ejemplo, de composición química y mineralógica conocida y homogénea, caracterizada por determinadas texturas y estructuras. Hagamos con ella una montaña, de forma y altura también conocidas. Pongamos la montaña en un clima arbitrario, semiárido por decir alguno, y cubramos las faldas con vegetación rala y pobre. Tengamos ahora lluvias esporádicas, cursos de agua intermitentes drenando los flancos de la montaña y colectándose en un cauce mayor en la llanura vecina. Armémonos de sabia paciencia y veamos qué ocurre en el transcurso de unos cuantos años. ¿Qué pasará? La arenisca será atacada por los agentes atmosféricos. La roca se desmenuzará, se desintegrará en fragmentos y los cursos de agua transportarán las partículas resultantes que irán finalmente a acumularse como arena en el cauce del río mayor.

Repitamos exactamente el experimento dentro de 10.000 años. Y volvamos a repetirlo dentro de 10.000.000. El resultado será siempre el mismo: arena en el lecho del río. ¿Por qué?

Sencilísimo. Porque las leyes naturales son fijas e inmutables y, por lo tanto, si no variamos las condiciones de "experimentación", los resultados de las experiencias serán siempre iguales e idénticos a sí mismos.

Hasta aquí la cosa es tan clara como dos y dos son cuatro. Y es evidente que con el resultado de nuestro experimento, podemos predecir cuál será el resultado de un experimento idéntico realizado dentro de 10.000.000 de años. O *hace* 10.000.000. Claro que la Madre Naturaleza no suele entretenerse repitiendo *exactamente* sus experimentos pero, por suerte, gusta copiarse a sí misma con largueza, insistiendo una y otra vez en lo mismo como si bordara innumerables variaciones sobre un tema de Mozart y eso nos permite, dentro de ciertos límites y con las reservas mentales del caso, aceptar la frase de Hutton de que "el presente es la clave del pasado".

Pero de allí a aceptar que todos los acontecimientos del pasado geológico pueden explicarse por el lento actuar de causas actuales, como quiere el "Actualismo", hay una gran distancia. Y mayor aun a aceptar que las causas que hoy actúan lo hicieron siempre con intensidad y ritmo uniforme, como quiere el "Uniformitarismo".

Pensemos en las figurillas en que se vería un geólogo viviendo en el período Triásico para explicar los depósitos glaciales del Pérmico. Depósitos acumulados por el hielo. "¿Hielo?" — diría —. "¿Qué es *hielo*?" Posiblemente no acabaríamos de convencerle de que esa substancia dura y fría que fabricamos en nuestras heladeras es la culpable de tales depósitos. Con ideas "actualistas" dudo que nuestro hipotético geólogo triásico desentrañara el origen de los depósitos glaciales acumulados un par de millones de años antes de que naciera, porque durante el Triásico la Tierra estuvo desprovista de hielo y nuestro colega jamás lo vio en su vida. Y si finalmente pudiéramos hacerle entender bien las cosas y le convenciéramos que en el pasado la Tierra tuvo glaciares y que a su acción se deben tales depósitos, tendríamos que callarnos la boca si nos preguntara: "¿De qué causas actuales me estáis hablando?". Después de semejante pregunta nos tomaría por locos rematados si insistiéramos en lo de la "intensidad uniforme" de los procesos glaciales. Y no sería para menos.

Pese a estos inconvenientes, el "Actualismo" y su hijastro el "Uniformitarismo", permitieron el rápido progreso de la geología durante el siglo XIX porque bien pronto se vió que, en términos generales y al menos para un importante conjunto de fenómenos, sino todos, era factible interpretar los acontecimientos pasados recurriendo "a las causas que hoy actúan".

Especialmente fructífero fué el "Actualismo" cuando se lo aplicó a desentrañar el origen o formación de las rocas sedimentarias y volcánicas. Porque aquí hubo y hay amplia oportunidad de observar los procesos en plena actividad, de ver cómo operan hoy día las "causas actuales" bajo diversas condiciones ambientales y de ver los sedimentos recién acumulados y las rocas volcánicas "recién salidas del horno". Claro que lo ideal sería experimentar, tal como hacen las demás ciencias naturales, la Química, la Física o la Fisiología. Y, en el fondo, realmente hacemos experimentos. La Geología, muy geológicamente, dice que si la montaña no viene a Mahoma, Mahoma irá a la montaña. Si no podemos volcar un río en nuestro laboratorio, pues intalemos el laboratorio a la orilla del río.

"Eso no es experimentar — se dirá —, "porque experimentar es controlar exactamente las condiciones bajo las cuales se opera y se produce el fenómeno". Sí, claro. En nuestro "laboratorio" junto al río no podemos controlar nada, pero sino controlar podemos, al menos, conocer las condiciones bajo las cuales se produce el fenómeno. Podemos medir el caudal del río, la velocidad del agua, la cantidad de material que arrastra, el tipo, forma y tamaño de los rodados que transporta, el desgaste que sufren, la manera cómo son llevados, el tamaño, forma y disposición de las partículas que se acumulan en el lecho... Y repitiendo las observaciones, aprovechando distintos "momentos" del río, grandes crecientes, épocas normales, estiajes, acumular una larga serie de datos "experimentales". Y buscar otros ríos, arroyos, canales, con distintos caudales, velocidades, materiales transportados. En pocas palabras, aprovecharnos de los experimentos que en materia de transporte y acumulación fluvial realiza permanentemente la Naturaleza, reunir una masa de datos observacionales con distintas variables, sistematizarlos y disponerlos luego en series continuas, tal como si nosotros mismos

hubiéramos controlado en verdad las condiciones experimentales.

Lo que nos interesa dilucidar aquí es el proceso genético. No nos importa mayormente saber que, dadas ciertas condiciones de caudal, velocidad y material transportado se originará un sedimento de tales o cuales características. Es a la inversa. Queremos saber, dado un sedimento de tales o cuales características, cuáles fueron las condiciones que controlaron su acumulación. Porque en geología lo concreto son los resultados de los procesos — los minerales, las rocas, los fósiles, las montañas —, y con esos resultados debemos desentrañar cuáles fueron los procesos formativos. Claro que, para ello, hay que invertir previamente el análisis para, una vez establecido el proceso genético de un tipo de sedimento, deducir, cuando encontramos el mismo tipo en la columna geológica del pasado, cuál fué su proceso formativo.

Comencemos con un conglomerado. Con un sedimento constituido por rodados de rocas diversas y de diversas formas y tamaños, envueltos en una matriz de material más fino — arena, limo, arcilla —. Sedimentos de este tipo se encuentran por doquiera y sabemos que, en la actualidad, se originan tanto por la acción acumulativa del mar como de los ríos, de los torrentes de montaña y de los glaciares. Es, pues, cuestión de investigar en el laboratorio de la Naturaleza qué características propias tienen, si es que tienen alguna, los conglomerados marinos, fluviales, torrenciales y glaciales que se están depositando hoy. Y si esas características son suficientes como para reconocer, por deducción, el origen marino, fluvial torrencial o glacial de conglomerados acumulados en épocas pasadas.

En las angostas playas donde el mar bate un alto acantilado podemos ver, a menudo, un “conglomerado marino” en formación. El mar, en cada alta marea, se lanza contra el pie del acantilado. Las olas arrojan fragmentos de piedra, como metralla incesante, contra la barranca, desgastándola, horadándola, socavándola hasta que todo el frente del acantilado se derrumba y cae al mar en pedazos. El mar engolfa los fragmentos. El vaivén permanente de las olas los lleva una y mil veces del mar a la costa y de la costa al mar, redondeándolos, puliéndolos, reduciéndolos. Cada trozo recorre centenares de kilómetros

yendo y viniendo y sin embargo está siempre en el mismo lugar. Apenas si se aleja unas pocas decenas de metros de la costa para volver a acercarse en cada viaje llevado por las olas. El resultado final es una playa formada por rodados altamente esféricos, altamente pulidos y calibrados que, por “selección mecánica”, son todos notablemente parecidos en cuanto a forma y tamaño.

El río — tomemos uno de montaña —, lleva su carga de bloques y rodados arrastrándola por “tracción” sobre su fondo irregular y áspero. Cada bloque, cada trozo, recorre una distancia considerable, medida en decenas de kilómetros, desde el lugar donde se desprendió de la roca madre hasta el lugar donde queda finalmente en reposo y se acumula. Pero el camino total recorrido es mucho menor que el de los rodados de la playa marina que, pese a depositarse casi donde se desprendieron como fragmentos de la roca madre, han sido traídos y llevados miles de veces y obligados a efectuar un largo viaje “en el lugar” antes de alcanzar reposo definitivo. Los rodados fluviales serán, pues, y hablando en términos generales, menos esféricos y menos “seleccionados” que los marinos, aunque igualmente redondeados y lisos. Y esa menor selección mecánica se traducirá no sólo en una mezcla de rodados de tamaño diverso, grandes a pequeños, sino también en la acumulación conjunta de granos de arena — y hasta quizá de limo y arcilla —, junto con los rodados. Las crecientes periódicas del río, a las que se deben en última instancia la acumulación final de los materiales que transporta, depositarán capas individuales, unas sobre otras, y el conglomerado resultante será estratificado, aunque con camadas irregulares y lenticulares debido a la irregularidad del transporte en cada creciente.

El glaciar, río de hielo, lleva los materiales de manera muy distinta. Aquí van juntos enormes bloques hasta de decenas de toneladas y polvo impalpable. El glaciar transporta parte de los materiales sobre su superficie misma y estos trozos, que van cómodamente cabalgando en su lomo, no sufren desgaste alguno y llegan al término de su viaje tal cual como se desprendieron de la roca madre, angulosos, cortantes, ásperos e irregulares. El mayor volumen de los fragmentos va en el interior o en el fondo del glaciar, aprisionado en un medio sólido que

fluye y se desliza plásticamente: el hielo. Los trozos, firmemente sujetos por la masa helada, se frotan unos contra otros o contra el piso mismo del glaciar con fuerza tremenda, se pulen como si se los cepillara y se marcan mutuamente con estrías y raspaduras, pero no se redondean. Bajo el glaciar, cerca ya del término de la lengua de hielo, corren torrentes de deshielo en verdaderos túneles sub-glaciales y allí los rodados se redondean y se alisan como los de un río cualquiera.

Cuando el hielo se derrite definitivamente, se disipa, y el glaciar desaparece, toda su carga se deposita en confusa mescolanza: bloques enormes, fragmentos angulosos, rodados redondeados, rodados facetados, pulidos y estriados envueltos en una masa fina de arena, limo y polvo o "harina de roca". Sin selección mecánica ni estratificación alguna.

Volviendo ahora a nuestro conglomerado, es cuestión de estudiarlo detenidamente. Analizar la forma, tamaño, redondeamiento, selección, constitución, disposición de los rodados y de la matriz que los une. Color, estratificación y demás estructuras. Y comparando los resultados del examen con las características que definen y diferencian a los conglomerados marinos, fluviales, glaciales del presente, deducir cuál ha sido el proceso formativo que, en el pasado, originó el que estamos estudiando.

Todos hemos visto en las arenas de las playas, de los médanos y de los ríos, curiosas olitas que arrugan la superficie como si fueran chapas de zinc. Se originan por una corriente, de agua o de aire, que arrastra a determinada velocidad las partículas de arenas sobre el "piso". El resultado final es una serie de ondulaciones asimétricas, con crestas levantadas pocos centímetros sobre los fondos o senos de las "olitas" sucesivas. Estas ondulaciones, que los ingleses llaman "ripplemarks" y que en castellano técnico conviene llamar "ondulitas" siguiendo a González Bonorino, son producidas por el mar, los ríos y los vientos. ¿Podemos distinguir unas de otras o al menos las "subaqueas" de las eólicas. Estudiando las que en la actualidad se originan en los ríos y en las playas por una parte y las que arrugan la superficie de los médanos por la otra, llegamos a la conclusión de que las originadas por corrientes de agua tienen crestas más altas y el índice de dividir la "longitud de

onda" (distancia horizontal entre cresta y cresta) por la "amplitud de onda" (distancia vertical entre cresta y seno) oscila entre 4 y 10. Para las producidas por el viento este índice varía entre 20 y 50. Si encontramos, pues, "ondulitas" fósiles arrugando la superficie de areniscas acumuladas en el pasado, no nos será difícil, saber si los sedimentos fueron depositados bajo agua o por la acción del viento.

Así, pues, recurriendo a la teoría "Actualista" no nos resulta difícil desentrañar la génesis, el modo de origen, de los sedimentos acumulados en épocas pasadas, aunque a veces encontremos problemas de solución ambigua o dudosa. Es que la Naturaleza es bastante amable y nos permite presenciar cómo se entretiene actualmente haciendo sedimentos aunque, a decir verdad, oculta celosamente algunos secretos de fabricación. Nadie ha visto, por ejemplo, cómo se acumulan los depósitos en los profundos fondos submarinos, a miles de metros bajo el nivel del mar y a centenares de kilómetros de los continentes.

La Naturaleza también experimenta por nosotros en materia de fabricación de rocas volcánicas y nos permite ver cómo se origina una roca dura y fría por consolidación directa de una lava incandescente y flúida, que sale por un crater y se desliza cuesta abajo por la ladera de un volcán actual.

Aquí tenemos otro conjunto de procesos, los volcánicos, que también actuaron en el pasado. Y, como en el caso de los sedimentos, debemos investigar cuáles son sus resultados para, estudiando los "resultados" del pasado, deducir el origen de los mismos. Claro que en este caso no es tan fácil instalarnos con un laboratorio junto a un volcán a ver qué pasa, mas así y todo, hace ya muchos años que laboratorios de verdad, bien equipados, funcionan junto al crater del Vesubio y al "lago de lava" del Halemaumau en las faldas del Kilauea en Hawai. Pero cuando el Vesubio o el Kilauea se enojan "en serio" no es cuestión de quedarse en el laboratorio a ver qué pasa, porque aunque lo viéramos no quedaríamos en condiciones de contarlos.

Hoy, aquella discusión famosa entre "neptunistas" y "plutonistas" nos parece absurda. ¡Tan fácil que hubiera sido, en vez de trenzarse en polémicas vanas, ir "a ver qué pasa" en un

volcán activo! Porque, al fin y al cabo, el Etna y el Vulcano, el Stromboli y el Vesubio, estaban suficientemente cerca y hubieran demostrado de inmediato que los basaltos no son más que lavas consolidadas y frías. Los basaltos y todo un conjunto de rocas similares, toda una "familia" de rocas que hoy reconocemos como de origen volcánico, como productos "efusivos", salidos al exterior de la Tierra en estado líquido y consolidados en la superficie misma por rápido enfriamiento.

Hay toda una serie de rocas volcánicas, desde comparativamente livianas, de color claro y con abundante cuarzo, a pesadas, oscuras, sin cuarzo y con abundantes minerales de hierro y magnesio. La mayor parte de estas rocas tiene un rasgo característico, un verdadero "aire de familia" que nos permite reconocerlas como tales. Están constituidas por cristales bien formados y bastante grandes, a veces hasta de un centímetro de largo, de algunos minerales comunes como cuarzo o feldespatos, envueltos en una pasta muy fina de cristallitos diminutos o simplemente de vidrio. A esta estructura llamamos "porfírica", nombre que nos viene del griego "porphyra" (=púrpura) con el que los antiguos designaban toda roca rojiza con manchas blancas, tal como la hermosa roca que los egipcios explotaban en las canteras de Djebel-Dokhan para sus templos.

Que la mayor parte de las rocas volcánicas tienen estructura porfírica es innegable. Cómo se ha originado esta estructura es ya harina de otro costal. Ciertamente es que la Naturaleza fabrica actualmente rocas volcánicas, pero cierto es también que no nos permite ver *todo* el proceso de fabricación. Es como si nuestra inspección de la panadería comenzara con la masa ya lista para entrar al horno y como si el panadero se negara rotundamente a enseñarnos el secreto de la masa en sí. Nuestro primer contacto (y un tanto lejano) con la "lava" comienza cuando sale incandescente del crater y se vuelca por la ladera del volcán. Y ya en la masa pastosa vienen flotando los cristales como pescaditos nadando en el agua. Lógico que, al salir la lava al exterior, esta pasta se enfríe rápidamente y, si el enfriamiento es muy rápido, la masa de silicatos fundidos se consolida como vidrio sin tener tiempo de cristalizar en diminutos gránulos minerales. Los cristales mayores, pues, vienen "prefabricados" cuando la lava sale por el crater. ¿Dónde se

formaron? ¿En la chimenea de ascenso, mientras la lava subía de la profundidad? ¿Más abajo aún, en el bolsón, reservorio o lo que fuere de "magma" flúido que alimentó la erupción? No lo sabemos a ciencia cierta, como no sabemos cómo, dónde y por qué se origina, a cierta profundidad bajo la superficie, ese "magma" que sale luego al exterior, entendiendo por *magma* una mezcla de silicatos fundidos de la cual puede originarse, por simple enfriamiento y consolidación, una roca volcánica.

Aquí entramos ya en terreno vedado. La Naturaleza no nos deja ver cómo fabrica el "magma". No nos deja ver qué hace con las rocas, sólidas, plásticas o fundidas, unos cuantos kilómetros por debajo de la superficie donde inferimos, partiendo de un conjunto de hechos observacionales, que han de reinar temperaturas y presiones considerables. Allí abajo han de originarse otros tipos de rocas que jamás hemos visto formarse en la superficie. Allí han de originarse las rocas "ígneas" del tipo de los granitos, por una parte, y las "metamórficas", como las pizarras y los esquistos, por la otra. Aquí, en la superficie, no se forma, de modo que no hay más solución que admitir que se forman "allá abajo". Sí. Pero ¿cómo? *That is the question*, como diría Hamlet si resucitara. *Question* cuya discusión reservamos para el capítulo siguiente.

EL REINO DE PLUTON

Este libro está resultando bastante menos ortodoxo de lo que me propuse. Y ya que me he dejado deslizar por una pendiente semi-herética, casi sería mejor pasarme con bombos y platillos al campo de los herejes redomados, que las cosas a medias nunca son buenas.

Si este libro llegara a manos de mi antiguo profesor de petrografía, seguro que me fulminaría con un "insuficiente" post-universitario pese a que, en la actualidad, somos excelentes amigos. Pero me he decidido a correr el riesgo ya que, poniéndome una mano en la conciencia (aunque a decir verdad no sé exactamente en qué parte de mi anatomía se aloja) no puedo seguir propalando ideas con las cuales ya no estoy de acuerdo.

No entiendo tampoco por qué en un libro de divulgación científica ha de insistirse siempre en presentar, bajo un ropaje que el inocente autor cree ameno, sólo las cosas archisabidas y trilladas, esquivando lo ambiguo, lo inseguro y lo desconocido. O simplemente lo nuevo. Para mí lo cautivante de la ciencia está precisamente en lo ambiguo, lo inseguro y lo nuevo y creo que todos me concederán que la teoría de Einstein es más interesante que el teorema de Pitágoras. Lo malo es que también es más complicada pero, al fin y al cabo, Pitágoras debió ser bastante complicado para sus coetáneos y sus teoremas tan abstrusos para el crotonense medio como la teoría de Einstein para el neoyorkino moderno.

Y bien. Desde hace más de un siglo la mayoría de los geó-

logos acepta que existen tres clases fundamentales de rocas: sedimentarias, ígneas y metamórficas. Las sedimentarias son aquellas que se han formado en la superficie de la Tierra por acumulación de fragmentos minerales, de otras rocas o de organismos. Las ígneas se han originado por la consolidación directa de un "magma" flúido, ya sea en la superficie de la Tierra produciendo rocas "volcánicas" como los basaltos, ya sea en el interior de la corteza dando origen a rocas "plutónicas" como los granitos. Por último, las metamórficas no son más que rocas sedimentarias o ígneas transformadas, en el interior de la corteza, a consecuencias de altas presiones, altas temperaturas o ambas combinadas.

Esta concepción, ordenada y simétrica, es esencialmente alemana y alcanzó forma definitiva en la segunda mitad del siglo pasado a manos de Suess y Rosenbusch. Naturalmente que todos estamos de acuerdo en lo que respecta a las rocas sedimentarias y a aquellas ígneas consolidadas en la superficie de la Tierra que llamamos volcánicas. Estas son rocas "uniformitarias" que aún podemos ver en plena formación. Pero ya no estamos tan de acuerdo respecto a las plutónicas y a las metamórficas que conocemos listas y terminadas sin que jamás las hayamos visto en proceso de formación. En realidad no es que estemos poco de acuerdo. Estamos completa y totalmente en desacuerdo y la geología moderna, recordando su belicoso pasado, embandera a los geólogos en dos campos opuestos que libran enconada, y a veces agria disputa, sobre el origen de los granitos y de las rocas plutónicas en general.

Los ortodoxos afirman rotundamente que los granitos y rocas similares son en verdad ígneas, es decir originadas por enfriamiento paulatino y final consolidación de un "magma" flúido en el interior de la corteza. Son, pues, "magmatistas". Los herejes afirmamos, casi con la misma convicción, que eso es un soberano y monumental disparate, que los granitos no se derivan de tal magma flúido, que nunca estuvieron flúidos y que no son más que rocas sedimentarias transformadas, sedimentos granitizados. Somos, pues, "granitizadores".

Es innegable que los magmatistas tienen razón al señalar que, por cada roca volcánica hay una plutónica de composición química y hasta mineralógica similar. A los basaltos corres-

ponden los gabbros, pobres en sílice y sin cuarzo libre. A las riolitas los granitos, ricos en sílice y con abundante cuarzo. Y a las andesitas, intermedias entre basaltos y riolitas, corresponden las dioritas, intermedias entre gabbros y granitos. La diferencia más notable está en la textura de las rocas, porfírica en las volcánicas y granosa en las plutónicas, formadas estas últimas por gránulos de distintos minerales pero de tamaño subigual. Nada más lógico, pues, que considerar a las plutónicas como equivalentes "profundos" de las volcánicas. Son rocas que se han originado por el lento enfriamiento de una masa fundida, de un "magma" sometido a gran presión, alojado en las capas altas de la corteza terrestre a la que no ha podido atravesar para alcanzar la superficie. Y por eso mismo han tenido tiempo de cristalizar íntegramente desarrollando una textura equigranular como la del granito. Son, por contraposición a las "extrusivas", rocas "intrusivas". Y como se las supone formadas "en lo profundo" donde tiene su reino Plutón, dios de los abismos infernales, las llamamos "plutónicas", con lo cual queda satisfecho nuestro sentido de la simetría al contraponerlas a las "volcánicas", que surgen al exterior por las bocas ignívolas donde Vulcano tiene sus fraguas.

Los magmatistas se preguntan ahora: Si es cierto, por una parte, que por cada tipo de roca volcánica existe uno plutónico similar y si es también cierto que las volcánicas salen al exterior en forma de magma flúido que asciende de una profundidad desconocida, ¿parte de ese magma no podrá quedar atrapado en la profundidad de la corteza y cristalizar allí dando origen a las rocas plutónicas? Y se contestan, naturalmente, en la afirmativa.

Todo esto es muy bonito, pero hay varios peros. En primer lugar lo de la equivalencia de las rocas volcánicas y plutónicas es perfectamente cierto, pero hay una curiosa desproporción en las cantidades respectivas. Los basaltos son, con mucho, las más frecuentes y abundantes rocas volcánicas pero en cambio los granitos son, y también con mucho, las más frecuentes y abundantes entre las plutónicas. Los gabbros, equivalentes "intrusivos" de los basaltos según los magmatistas, forman escasas y misérrimas masas cuando las comparamos con las enormes extensiones cubiertas por sus "equivalentes extrusi-

vos". En la cuenca del Paraná, no más, los basaltos cubren una extensión de más de un millón de kilómetros cuadrados con espesor medio de 700 a 800 metros y casi otro tanto cubren en la península de la India. Los grandes fondos oceánicos están formados por basaltos y las "islas oceánicas" como Islandia, las Sandwich y tantas otras, están constituídas casi exclusivamente por estas rocas. Los gabbros, en cambio, forman escasas y diminutas masas, la mayor de las cuales apenas si alcanza a unos 20 ó 30 kilómetros de largo.

En el caso de los granitos y riolitas la relación se invierte. Los granitos y rocas similares afloran en enormes extensiones. Forman grandes áreas del Canadá, Brasil, Africa central. En los Andes australes constituyen inmensas masas que se extienden por más de 3.000 kilómetros desde el norte de Chile hasta Tierra del Fuego. Frente a ellas las riolitas forman manchones pequeños y dispersos, de espesor y extensiones reducidos.

Esta desproporción y esta abundancia de basaltos y granitos, llevó a mediados del siglo pasado a suponer que, en la profundidad de la corteza terrestre había dos "magmas fundamentales" de distinta composición química, basáltico el uno y granítico el otro. Pero hasta los más decididos magmatistas han abandonado hace mucho este concepto y creen que hay uno solo, basáltico, del cual se derivan todas las rocas ígneas, tanto volcánicas como plutónicas, por un proceso de "diferenciación en la cristalización" del flúido. En este magma único, formado ante todo por una mezcla de silicatos de aluminio, potasio, sodio, calcio, hierro y magnesio, comienzan a cristalizar primero estos últimos. El líquido remanente se va haciendo cada vez más rico en sílice y en silicatos alcalinos hasta alcanzar la composición química de un granito. El magma es ahora una especie de esponja empapada: la parte sólida constituída por los cristales de silicatos de hierro y magnesio ya formados y la líquida por la mezcla remanente, que ocupa los intersticios entre aquellos cristallitos. Y si ahora apretamos la esponja, el líquido sale. Si el magma profundo es comprimido por alguna razón, digamos presiones tectónicas, el líquido se separa de la fase sólida y, naturalmente, tenderá a subir ya que la presión disminuye hacia la superficie de la Tierra.

Espléndido. Lo grave es que, para producir granito de esta

manera, necesitamos una barbaridad de "magma basáltico" porque hasta los más fervientes magmatistas admiten que la cantidad de granito que se puede derivar por "diferenciación" no puede exceder mucho del 10 % del volumen del magma basáltico original. Y una barbaridad de energía. Tanta que, para el caso de una enorme masa granítica como la de la Cordillera Patagónica, el problema de la energía necesaria se hace realmente agudo. Tan agudo como el problema de saber que se ha hecho del 90 % restante del "magma basáltico diferenciado", que no aparece por ninguna parte.

El segundo pero es el problema del "espacio vital". Los grandes cuerpos de rocas plutónicas tienen a menudo tamaño gigantesco. Los vemos aflorar en extensiones enormes, de decenas y centenares de kilómetros a veces, encajados entre rocas sedimentarias, sin mostrar "piso" como si se prolongaran indefinidamente hacia abajo hasta profundidades desconocidas. Y las "rocas de caja", dentro de las cuales parece haberse introducido la inmensa masa flúida, no presentan indicios de perturbaciones producidas por tal invasión. ¿Cómo es posible? ¿Cómo es posible que una masa fundida de kilómetros y kilómetros cúbicos haya desalojado de su lugar a un volumen igual de rocas preformadas, bien sólidas por cierto, sin que quede el más leve rastro de tal fenómeno?

Los magmatistas intentaron explicar este problema del "emplazamiento" y del espacio diciendo que la masa ígnea al ascender de lo profundo e intrusarse en las capas altas de la corteza terrestre, socava su techo, despedaza a las rocas frías preexistentes y las englute. Los grandes colgajos, desprendidos del techo y de las paredes de la masa ascendente, se sumergen lentamente en el flúido y son licuados, deglutidos y asimilados, desapareciendo finalmente y yendo a formar parte integrante de la masa ígnea. Esta fué la explicación de Daly y la hipótesis se conoce como "teoría de stoping", de un término minero inglés que significa excavar desde abajo hacia el techo de una mina, procedimiento de explotación que nosotros llamamos de "realce".

Esta hipótesis es perfectamente válida y el fenómeno de "stopping" sin duda existe, pero circunscripto y localizado a áreas pequeñas. "Stopping" en gran escala, en la inmensa escala

necesaria para emplazar una masa granítica como la de la Cordillera Patagónica por ejemplo, significaría que un inmenso volumen de rocas preexistentes es deglutinado y asimilado por el magma granítico ascendente, que cambiaría fatalmente de constitución química dando origen a numerosos derivados. Por otra parte, estudios realizados en los últimos 15 ó 20 años, analizando minuciosamente las texturas y estructuras de las masas graníticas — orientación de los cristales, ordenación de las inclusiones de rocas extrañas, fisuras producidas por contracción durante el enfriamiento final —, han demostrado que en la masa consolidada no quedan señales del "hundimiento" de bloques sino sólo de corrientes ascendentes del flúido viscoso. Y en un magma viscoso difícilmente podrían hundirse grandes bloques desprendidos del techo, máxime si, hacia abajo, el granito pasa a "magma basáltico" como quieren los magmatistas con su teoría de la diferenciación.

Por estas razones muchos geólogos prefieren explicar hoy el origen de los granitos de modo totalmente distinto. Y, abandonando la idea magmatista, suponer que se trata de rocas "granitizadas", *in situ*, de sedimentos transformados de tal suerte que su composición primitiva y sus texturas y estructuras originales se han perdido, borrándose completamente hasta que la roca ha cobrado "aspecto ígneo".

La idea no es nada nueva. La encontramos ya en Lyell, quien la expuso en 1838. Y los franceses, desde la época de Elie de Beaumont (1847) hasta la actual, pasando por la de Michel-Levy y Termier, la han defendido una y otra vez. En la actualidad ha cobrado preeminencia no sólo en Francia, sino en Finlandia, Suecia e Inglaterra. Y es H. H. Read, de Londres, el sumo pontífice de la "vieja" escuela que los magmatistas, horrorizados, rechazan como "nueva" herejía.

Lo grave del asunto es que los granitizadores, aunque unidos contra los magmatistas, no estamos de acuerdo entre nosotros. Podemos dividir a los granitizadores en tres grandes grupos: los fundidores, los mojados y los secos.

Los "fundidores" creen que los granitos se han originado por simple fusión de sedimentos u otras rocas preexistentes. Creen que si la base de la corteza terrestre, normalmente a una profundidad del orden de los 30 kilómetros, es arrastrada hacia

abajo hasta 80 ó 90, como se supone que ocurre en las áreas geosinclinales, los materiales pueden llegar a fundirse en escala gigantesca originando un verdadero "magma granítico" del cual se derivarían las rocas plutónicas en la manera clásica aprobada por los magmatistas.

Los "fundidores" casi no merecen el nombre de granitizadores y son mirados con cierto recelo por los mojados y los secos. Representan al sector de la derecha y se hacen sospechosos de simpatizar con los magmatistas empedernidos.

El sector del medio, con el mayor número de bancas, está ocupado por los "mojados". Para ellos los granitos se han originado por un proceso por el cual las rocas sólidas se convierten en rocas de "carácter granítico" sin pasar por un estado magmático. Son rocas preexistentes, por lo común sedimentarias, que han sido transformadas por la penetración de una cantidad modesta de flúidos magmáticos. Estos flúidos magmáticos, a los cuales Sederholm dió el nombre de "ícor" (¡Oh, dioses del Olimpo!) se habrían originado "allá a lo lejos y hace mucho tiempo" como hubiera dicho Hudson. Allá a lo lejos, en las capas bajas de la corteza terrestre y hace mucho tiempo, cuando la Tierra se estaba enfriando y lo cristalizable cristalizaba (¡Oh manes de Laplace!). Se trataría de una especie de "flúido residual" atrapado en las capas bajas de la corteza, dotado de alta movilidad por un alto contenido en vapor de agua y substancias volátiles y, por lo tanto, procurando siempre migrar hacia los niveles superiores. En determinadas zonas inestables y móviles de la corteza — los geosinclinales —, el ascenso de estos flúidos se facilita. Los ícores suben de la profundidad, invaden lentamente los sedimentos sometidos a altas presiones y temperaturas elevadas en la base del geosinclinal, los "empapan" y poco a poco los transforman por un proceso de reemplazo químico, hasta que todo el conjunto se ha convertido en un *granito* sin que, en ningún momento, las rocas hayan estado fundidas. Y todo eso con una pequeña cantidad de "flúido", quizá menos del 10 % del total resultante. Por lo menos no se puede negar que los granitizadores "mojados" han reducido a términos modestos el problema formidable del emplazamiento y del espacio.

Y ahora les toca el turno a los granitizadores de decir algo. Ciertamente es que los magmatistas tienen razón en eso de que cada tipo de roca volcánica tiene un equivalente plutónico, pero no es menos cierto que jamás hemos podido ver la transición gradual y paulatina de una roca plutónica a una volcánica. En cambio sí que se puede ver en muchos lugares la transición gradual y paulatina de una roca sedimentaria a un granito y si no que lo digan Barrois con sus estudios en Rostrenon, Goldschmidt en Stavanger, Anderson en los montes Inyo, Wegmann en Groenlandia, Fernando en las islas Shetland, Cheng en Inglaterra y miss Reynolds en Irlanda. No por nada la mayoría de los granitizadores son geólogos, mientras los más recaltrantes magmatistas son, ante todo, petrógrafos como fuera Niggli, recientemente desaparecido, en Suiza, y como son Bowen, Buddington y Grout en los Estados Unidos. Como bien dijera Read, la diferente interpretación se debe un poco a que los geólogos vemos las relaciones genéticas de grandes masas de rocas en el campo mientras los petrógrafos, con algunas honrosas excepciones, hacen ante todo "petrographie des tiroirs" como la llamara Gignoux, "petrografía de muestras de mano"...

Pero existe todavía la posición de extrema izquierda, los vanguardistas, los granitizadores "a seco", pese a que el epíteto más parece extraído de la jerga de los tintoreros que del lenguaje recatado de la ciencia. Enarbolando el pabellón revolucionario gritan a voz en cuello: "¡Abajo los magmatistas! ¡Abajo los magmas! Nada de flúidos, emanaciones líquidas, ícores! ¡Abajo todo!". Y luego, ya más calmos, proceden a explicarnos que los granitos se han originado por un proceso de reemplazo, pero no debido a flúidos que se insinúan entre las rocas preexistentes y las empapan, sino por "difusión sólida", por migración de iones a través de los cristales de la roca que está siendo granitizada.

Los cristales, como dijera Joffe, son "espacio vacío con diminutas partículas cargadas eléctricamente, distribuidas a enormes distancias unas de otras" y, por lo tanto, presentan condiciones ideales para la difusión sólida. Por otra parte el "retículo cristalino", es decir la disposición geométrica de los átomos que intervienen en la formación de un cristal, nunca es perfecto, sino que adolece de "defectos" debidos al creci-

miento inicial rápido de los cristales, a presiones diferenciales y a vibración térmica de los átomos que, teóricamente, sólo están en reposo perfecto a la temperatura de cero absoluto (-273 grados centígrados). Y son estos defectos los que permiten la difusión sólida y la entrada de iones extraños dentro del cristal.

Los más avanzados izquierdistas, y entre ellos Ramberg y Bugge, piensan que los átomos en el interior de la corteza tienen una tendencia a migrar hacia la periferia siguiendo el gradiente normal de temperatura y presión de la Tierra. Pero, según ellos, no todos los átomos tienen esta tendencia o, mejor dicho, no todos la tienen con la misma intensidad. Los más activos serían los de aluminio, potasio, silicio, sodio y quizá también los de hierro y magnesio. Se produciría así una "flujo ascendente" de "nubes de iones", que substituirían a otros en los cristales de las rocas preformadas y estos iones desplazados descenderían en una contracorriente de dirección inversa. El resultado final sería la gradual "granitización" de las rocas por aporte de aquellos iones ascendidos desde la profundidad de la corteza.

Pero sabemos todavía demasiado poco acerca del fenómeno de la "difusión sólida" como para abrazar decididamente estas ideas y, por el momento, parece más prudente quedarnos en el campo de los "granitizadores mojados".

Estos viejos-nuevos conceptos acerca del origen de los granitos hacen también cambiar las ideas sobre el origen de las "rocas metamórficas". Metamorfismo significa cambio de forma y con esa palabra designamos los procesos que cambian las texturas, estructuras y hasta la composición mineralógica y química de rocas preformadas, convirtiéndolas en otras muy distintas. De acuerdo con las ideas clásicas estos cambios se producen, en el interior de la corteza, debido a la acción de presiones elevadas, de temperaturas elevadas o de presiones y temperaturas actuando al mismo tiempo.

Tengamos una arcilla depositada en la superficie de la Tierra. El primer cambio que sufre el sedimento es una compactación debida al peso de nuevos sedimentos que se acumulan sobre la arcilla y ésta se convierte lentamente en una "lutita". Supongamos que nuestra arcilla se acumuló en ambiente ma-

rino, en un geosinclinal, en plena fase de hundimiento. A medida que el fondo de la cubeta sedimentaria se hunde y nuevos sedimentos se acumulan en ella, nuestra arcilla descende cada vez más abajo, alcanzando zonas de mayor temperatura y estando sometida a presiones siempre crecientes. La lutita se convierte ahora en "pizarra". Roca dura, de grano muy fino y caracterizada por una alta esquistosidad o fisilidad, que permite dividirla en hojas delgadas. Sigue nuestra roca hundiéndose más abajo y alcanza zonas de mayor presión y de mayor temperatura, cubierta ahora por algunos kilómetros de otros sedimentos. Y la pizarra se convierte en "filita", también fisible en lascas, pero no tan perfectas debido al grano más grueso de los minerales recrystalizados. Aumenta aun más el grado de metamorfismo y la filita pasa a "micacita", a un esquistos micáceo de grano grueso, con esquistosidad más burda. Y llegamos al extremo de la serie del "metamorfismo regional" y la micacita pasa a "gneiss", roca de grano más grueso aun, parecida a un granito, pero con esquistosidad pronunciada.

La serie arcilla → lutita → pizarra → filita → micacita → gneiss muestra los cambios típicos del metamorfismo "progresivo". Cada estadio está caracterizado por un conjunto de minerales estables bajo determinadas condiciones de presión y temperatura. Al aumentar éstas, aquellos minerales dejan de ser estables y aparecen otros granos nuevos, y estos cambios van acompañados por una recrystalización en granos individuales de tamaño cada vez mayor, desde la pizarra al gneiss.

Pero hoy sabemos que, por exclusivo aumento de presión y temperatura, esta serie sería imposible. Todo anda bien hasta llegar a la filita, pero para pasar de filita a micacita, necesitamos algo más que un simple aumento de la presión y de la temperatura. Necesitamos "aporte ígneo". Necesitamos añadir algo a la roca, ya sea en forma de flúidos magmáticos, de emanaciones, ícores o "nubes de iones". Porque los análisis químicos de las micacitas y de los gneiss demuestran que estas rocas tienen siempre mayor cantidad de algunos elementos, tales como potasio y sodio, que las arcillas y pizarras de las cuales se han originado. En estas rocas hay siempre "aporte", hay siempre

“adición” de substancias y no simplemente recristalización de los materiales primitivos.

Por esta razón la mayor parte de los granitizadores agrupamos a los granitos y a las rocas metamórficas en una sola categoría a la cual, siguiendo a Read, podríamos llamar en verdad “plutónica”. Y no hay duda que entre gneisses y granitos existe toda la gama posible de estadios intermedios que designamos ambiguamente como “gneiss-granítico” y “granito gneissoide”. El resultado final del metamorfismo regional, o mejor aun de los “procesos plutónicos”, no es el gneiss, sino el granito.

X

EN EL CUAL SE DEMUESTRA LA ESTRECHA RELACION QUE EXISTE ENTRE LA VIDA PRIVADA DE LAS MONTAÑAS Y UNA OLLA DE PUCHERO

El hombre es un bípedo que se distingue de los demás no sólo por ser implume, sino por sus hábitos inquisitorios y su insaciable curiosidad. Nada le atrae más que hurgar en la vida privada de sus congéneres. Se complace en analizar la nariz de Cleopatra, la hidropesía de Beethoven, las amistades de César y los amores de George Sand. Y cuando se aburre de sus semejantes, se entretiene escarbando en la vida privada de los insectos, de las plantas o de las montañas.

Porque las montañas tienen vida privada. Eso que vemos allí, sobresaliendo como cordillera imponente, no fué siempre cordillera y, con el andar de los siglos y milenios, llegará el día en que dejará de serlo.

Corría ya la segunda mitad del siglo pasado cuando en Norteamérica, desarrollaban su labor los “cinco grandes” del Servicio Geológico de Nueva York: Hall, Emmons, Mather, Conrad y Vanuxem. Y en 1859, Hall, grande entre grandes, resumía en el tercer volumen de esa obra famosa que se llama “Paleontología de Nueva York” los resultados de sus estudios en los Apalaches.

Por aquel entonces los Apalaches eran las montañas mejor conocidas del mundo, en especial los tramos que se extienden por el Estado de Nueva York no muy lejos del lugar donde

escribo estas líneas. Y por ser los Apalaches tan bien conocidos, los trabajos de Hall tuvieron resonancia mundial casi inmediata y dieron pie a fructíferas discusiones. Sus ideas fueron el punto de partida de los conceptos modernos sobre el cómo y el por qué de las montañas.

Hall, agudo observador, percibió claramente dos rasgos esenciales de los Apalaches y, con segura intuición, generalizó sus conclusiones a otras montañas. Las cadenas montañosas — dijo — ocupan fajas alargadas donde existe un gran espesor de sedimentos. Y cuanto más joven la montaña más grande el espesor de los depósitos. Estos son, en su mayor parte, sedimentos acumulados en aguas de escasa profundidad y su presencia en estas fajas montañosas indica que en ellas la corteza terrestre ha cedido deformándose en batea y permitiendo la acumulación de una ingente masa de detritus en mares someros. Y de allí concluyó que la deformación misma de la corteza se debe al peso de los sedimentos que se iban acumulando en aquellas “bateas” alargadas. Y supuso que el plegamiento y comprensión de los sedimentos depositados en estas fajas se debía al arqueamiento del fondo de la batea. Las intrusiones de rocas “ígneas” y el metamorfismo de los sedimentos originales se debía también a esta misma causa y por ello estos fenómenos alcanzaban máxima intensidad a lo largo del eje de las cadenas montañosas, disminuyendo y muriendo hacia los bordes.

Las ideas de Hall fueron aceptadas con entusiasmo por muchos geólogos, pero en 1866, otra de las grandes figuras norteamericanas de la época, James Dana, dió a conocer una primer crítica, oponiéndose al concepto de que la corteza terrestre se deformara bajo el peso de los sedimentos y se arqueara en batea por esta causa. Pero — dijo Dana —, aun admitiendo tal hundimiento por peso de sedimentos, la hipótesis serviría sólo para explicar la acumulación de los depósitos y no el levantamiento de las montañas, con lo cual Hall habría expuesto “una teoría para explicar el origen de las montañas en la cual no se toma en consideración el origen de las montañas”. Frasquita que, naturalmente, gustó poco a Hall, quien replicó, un tanto amesclado, que él no había intentado explicar nada, sino tan sólo exponer algunos hechos llamativos. No le interesaba teorizar

“porque tales argumentos no son siempre filosóficos por falta de base en materia de hechos y son siempre insatisfactorios por dar una solución muy inadecuada del problema”. Sólo le faltó decir, como Newton, “hypotheses non fingo”.

Dana volvió a la carga en 1873. Y en este trabajo aparece por primera vez la palabra “geosinclinal”. Dana pensó en los continentes y en las áreas oceánicas como en dos grandes divisiones de la corteza terrestre constituídas por materiales distintos, que reaccionaban de manera diferente a las presiones laterales originadas por la contracción de la Tierra. Y en los bordes de los continentes se acumulaban grandes espesores de sedimentos, en fajas oceánicas ceñidas a la tierra donde, por efecto de las presiones laterales, cedía el fondo marino deformándose en largas y angostas cubetas. A estas cubetas largas y angostas, adosadas a los continentes, receptáculos naturales de los sedimentos derivados de la destrucción de la tierra firme, Dana llamó “geosinclinales”. Y en oposición a las ideas de Hall, la acumulación se efectuaba allí no porque el fondo se hundiera bajo el peso de los sedimentos, sino a la inversa, porque al hundirse el fondo se originaba la depresión que permitía la acumulación de los detritus transportados desde el continente vecino. Es algo así como el problema del huevo y la gallina.

La idea de Dana tuvo, desde un principio, considerable aceptación, pero siempre existieron “Hallistas” convencidos. En el último decenio un grupo de geólogos norteamericanos interesados en los problemas de la costa norte del golfo de México ha vuelto a sostener, de manera enfática, el hundimiento por peso de los sedimentos. Creen que pueden demostrar tal cosa porque el material que el Mississippi vuelca al mar, de no hundirse la cubeta marina, pronto sobresaldría formando islas cada vez más extensas. Pero lo único que demuestran con eso es que la cubeta se hunde. Es algo así como aquello de “ego cogito, ergo suum”. ¡Tonterías! Con el “ego cogito” lo único que puedo demostrar no es que exista mi “ego”, sino mi “cogito”. Mis propias convicciones en materia de hundimiento están decididamente en favor de los “Danistas” y me inclino a pensar que el huevo es anterior a la gallina...

Con Haug, gran geólogo francés de principios de siglo, la “teoría de los geosinclinales” tomó carta de ciudadanía europea.

Los Alpes comenzaban a conocerse tan bien como los Apalaches (hoy se los conoce mejor) y a ellos aplicó Haug las ideas de Hall y de Dana, pero modificándolas substancialmente. Quizá la modificación más importante (y en términos generales la menos afortunada) fué mantener que en aquellas largas cubetas los sedimentos predominantes no eran depósitos de aguas someras, sino de cierta profundidad, quizá hasta de 1.000 metros. Y a estos depósitos Haug llamó "batiales", de *bathos* = profundo.

Vinieron luego los trabajos de toda una pléyade de investigadores. Genios como Argand, analistas como Kober y Kraus, sintetizadores como von Bubnoff y Stille. Las Indias Orientales arrojaron insospechada luz sobre el problema y los estudios de Vening Meinez, Umbgrove y Kuenen, algunos de muy corta data, son ya clásicos. En Norteamérica, patria de la teoría, las investigaciones prosiguieron con Schuchert, Daly, Bucher Kry-nine y Marshall Kay para citar unos pocos. Muchas son las opiniones que se han emitido y varios los "camino de ataque" al problema y aunque existe bastante diversidad en cuanto a detalles hay, sin embargo, un consenso general si bien un poco vago y nebuloso acerca de las cosas básicas y fundamentales.

Kraus, Stille y Kay son quienes han desarrollado con más detalle una teoría formal, amplia, congruente y "evolutiva" que nos lleva desde los estadios iniciales de un "geosinclinal" hasta la aparición final de las montañas, allí donde existiera antes la cubeta marina receptáculo de los sedimentos.

Comienza la historia con lo que Kraus llamara "estadio pre-orogénico". Frente al borde continental, o interpuesta entre dos continentes, aparece la depresión larga y relativamente angosta del fondo marino que comienza a hundirse poco a poco. La longitud de las cubetas se medía en miles de kilómetros y su ancho en decenas o quizá escasos centenares: algo así como las actuales fosas oceánicas adosadas al borde pacífico de Sud América o a las guirnalas de islas del Extremo Oriente, Malasia y Polinesia. Los ríos, trayendo desde el continente vecino los materiales terrígenos resultantes de la erosión de la tierra firme por los agentes atmosféricos, descargan en el mar. Y durante un largo período, que se mide en millones de años, se va acumulando una espesa "serie sedimentaria" en la cubeta a

medida que el fondo original de la misma se hunde lentamente permitiendo con ello la deposición de los materiales.

Viene luego el "estadio cata-orogénico". Se acelera el hundimiento de la cubeta, pero al mismo tiempo que algunas fajas se hunden otras se elevan. El fondo original se ondula marcadamente y las fajas elevadas alcanzan a sobresalir del mar formando verdaderas guirnalas de islas. Y estas partes emergidas son, lógicamente, atacadas de inmediato por los agentes atmosféricos y erodadas, mientras en las depresiones interpuestas entre ellas, o entre ellas y los bordes continentales, se acumula rápidamente una masa de detritus con escasa selección mecánica debido a la velocidad con que se efectúa el transporte y la deposición. En el fondo de estos "geosinclinales secundarios", separados por las dorsales emergidas o "geanticlinales", aparece actividad volcánica que se manifiesta en erupciones submarinas de basaltos y en la intrusión de "filones-capas" de la misma roca, que se insinúan entre los sedimentos del fondo de la cubeta geosinclinal.

Viene luego el "estadio epi-orogénico". Toda la masa sedimentaria alojada en el gran geosinclinal, en la gran cubeta primaria, se comprime lateralmente, se pliega en intrincadas contorsiones y se levanta poco a poco. Los "geosinclinales secundarios" originados durante el estadio anterior se elevan sobre el nivel del mar y cesa en ellos la acumulación. Toda la faja central del gran geosinclinal entra en fase de ascenso y se levanta una gran montaña media, al mismo tiempo que se produce intenso metamorfismo y granitización de sus raíces. En el frente de la masa montañosa elevada se origina una depresión donde se acumulan rápidamente, en ambiente de mares someros o de lagos, los detritos provenientes de la destrucción de la montaña que comienza a ser erosionada en cuanto comienza a elevarse.

Y todo termina con el "estadio post-orogénico", durante el cual, a consecuencias de un reajuste isostático, se hunden y se levantan bloques diferencialmente hasta que queda restablecido el equilibrio roto durante la fase de plegamiento, compresión y levantamiento de la masa sedimentaria. El "geosinclinal" ya no existe. En su lugar hallamos ahora una montaña compleja, formada por sedimentos marinos fuertemente plegados, en parte

metamorfizados y granitizados, con interposiciones de rocas volcánicas de tipo basáltico. Han transcurrido quizá cinco, diez, veinte, cincuenta millones de años desde el momento en que comenzó a hundirse el geosinclinal y el momento de la aparición de la montaña allí donde antes se extendía una larga cubeta marina. Y casi todo ese largo tiempo se insumió en los estadios iniciales, en la acumulación de sedimentos mientras se hundía lentamente el fondo original de la batea.

En la evolución de un geosinclinal está patente el "ciclo de los fenómenos geológicos". Todo comienza con los procesos litogénéticos, formadores de rocas. En la cubeta que se hunde se depositan rodados, arenas, arcillas, limos y barros, calcáreos o no, que más tarde se endurecerán dando origen a conglomerados, areniscas, lutitas, calizas. En ninguna parte actúan con más intensidad y más prolongadamente los procesos sedimentarios. Y luego, cuando comienza la compresión del geosinclinal, se unen a estos los procesos volcánicos y nuevas rocas se forman por erupciones submarinas. Estos procesos litogénéticos son seguidos por los diastróficos y plutónicos. El conjunto de las rocas sedimentarias y volcánicas es comprimido plegado, dislocado y, al mismo tiempo, las "raíces" profundas del conjunto, metamorfizadas y granitizadas. Las fases finales de los procesos diastróficos originan el levantamiento del prisma sedimentario sobre el nivel del mar. E inmediatamente comienzan a actuar los procesos "gliptogénéticos", los que destruyen las rocas y modelan el relieve de la masa montañosa. Formación de rocas, modificación de rocas, destrucción de rocas. Y los materiales arrancados a la nueva montaña son arrasados al mar, depositados en un nuevo geosinclinal, comprimidos, metamorfizados, elevados, nuevamente en otra montaña más nueva aún, adosada a la antigua ya destruida. Y la nueva montaña vuelva a ser erosionada. Y así, *ad infinitum*.

Claro que hay geosinclinales y geosinclinales. Y como el hombre padece de una verdadera manía clasificatoria, los geosinclinales se clasifican en varios tipos. Sólo que nadie está muy de acuerdo con la clasificación de su vecino. "Una estrella difiera de la otra en su gloria" y cuando analizamos uno a uno los geosinclinales del pasado o mejor dicho las montañas resultantes de su evolución, casi parece que hubiera tantos tipos

distintos como montañas conocidas. Sin embargo (¡Oh milagro!), estamos más o menos de acuerdo en admitir que hay dos clases fundamentales de geosinclinales; los lineales, periféricos con respecto a los continentes como los del borde pacífico de América y los interpuestos entre dos masas, continentales como el alpino y el appalachiano. Pero no es cuestión de entrar aquí en detalles y de explayarnos sobre los *eugeosinclinales* con abundantes rocas volcánicas, los *miogeosinclinales* sin ellas y toda la cohorte de términos acuñados para describir tipos distintos. Ni de reseñar siquiera una clasificación moderna como la de mi buen amigo Marshall Kay con la cual (¡Oh milagro!) estoy bastante de acuerdo, aunque naturalmente no del todo. No es que tal disquisición "nos llevaría demasiado lejos", como es costumbre que el autor diga cuando no tiene ganas de meterse en honduras, sino que no nos llevaría a ninguna parte. Más que a una clasificación muy interesante para un geólogo, y ni siquiera para un geólogo común y silvestre sino para uno especializado a *outrance* en cuestiones tectónicas.

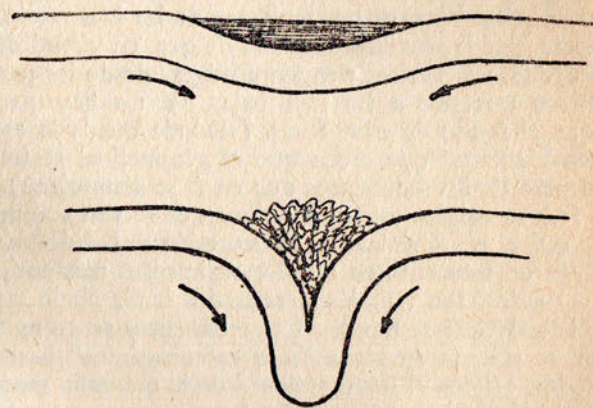
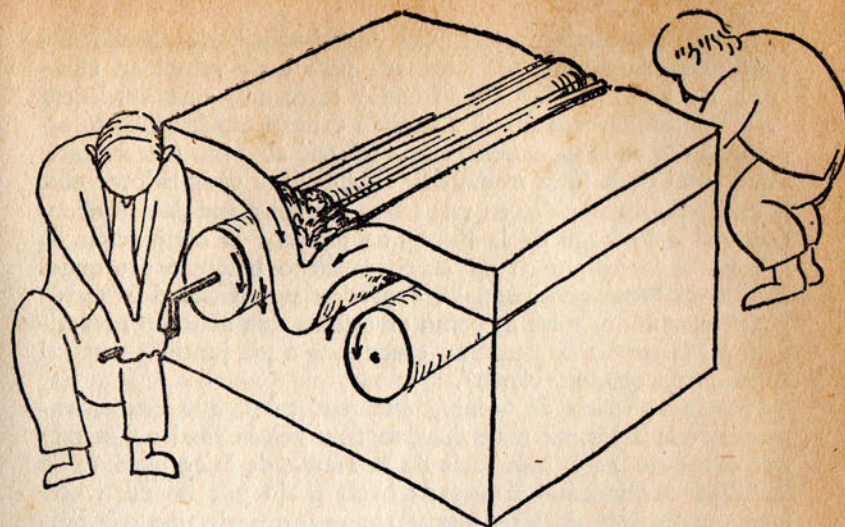
Lo realmente interesante de la teoría de los geosinclinales es que provee una bonita explicación del origen de las montañas. Pero en cambio nos plantea otro problema, el del origen de los geosinclinales. Porque está muy bien eso de decir que las montañas se formaron en geosinclinales pero: ¿Y los geosinclinales? ¿Cómo se originaron? ¿Por qué se hundieron, se comprimieron y se elevaron? Hemos explicado el mecanismo, pero no las causas del mecanismo.

Y aquí es donde interviene Vening Meinesz y los estudios de la escuela holandesa en las Indias Orientales, especialmente en Java y Sumatra. Las investigaciones geológicas de superficie completadas con estudios geofísicos sobre la distribución de las anomalías de la gravedad en estas regiones condujeron a Vening Meinesz a bosquejar una teoría según la cual el geosinclinal y su evolución — fosa marina, sedimentación, compresión, elevación —, no son más que expresiones superficiales de algo mucho más importante que ocurre más abajo, en el interior de la corteza terrestre.

La capa superior de la corteza, el "sial", "capa granítica", "capa continental", o como quiera llamársele, tiene un espesor medio de unos 20 a 30 kilómetros y reposa en equilibrio isos-

tático sobre la capa profunda más densa, el "sima", "substrato" (o como quiera llamársele). Supongamos ahora que el substrato, en vez de estar quieto, se mueve. Digamos que una "corriente de sima" se desplaza lentamente de este a oeste con un ancho o frente de varios centenares de kilómetros. Y admitamos, frente a ella, otra corriente similar pero dirigida de oeste a este. Las dos corrientes opuestas al encontrarse y "chocar" tienen, fatalmente que variar de dirección y girando 90 grados, de horizontales que eran hacerse verticales y hundirse en el interior de la Tierra. Allí abajo, en una profundidad desconocida pero sin duda grande, deben volver a torcer su curso y dirigirse otra vez "horizontalmente" pero en sentido inverso al que tienen cerca de la superficie, para luego levantarse verticalmente y cerrar el circuito. Imaginamos, pues, dos corrientes circulares, o mejor dicho cilíndricas, que giran en sentidos opuestos aparentando chocar cerca de la superficie. ¿Qué sucederá con la capa superficial de "Sial" que flota sobre el "sima"? El "sial" es llevado pasivamente en el lomo de las dos corrientes opuestas hacia el oeste y este respectivamente, hacia la zona en la cual las dos corrientes "chocan", viran de curso y descienden verticalmente. Y allí, la capa de sial debe ser arrastrada hasta cierta profundidad, dependiendo tal profundidad de la velocidad de las corrientes, del espesor de la capa siálica y de la diferencia de densidad entre sial y sima. En una palabra, la capa de sial se espesa en esa zona formando una especie de "raíz" o cuña que se sumerge en el sima hasta profundidades del orden de 90 a 100 kilómetros. A esto llamó Kuegen un "tectógeno".

Kuenen primero y Griggs después han realizado elegantes experimentos de laboratorio para reproducir en pequeña escala este fenómeno. Griggs llenó un tacho con glicerina, sumergiendo en ella dos tambores que podía hacer girar en sentidos opuestos. Y cubrió la superficie de la glicerina con una capa delgada de un material más liviano, pastoso y plástico. La glicerina representa al sima o substrato y la capa superficial a la corteza siálica o continental. Haciendo rotar los tambores en sentidos opuestos provocó dos corrientes cilíndricas en la glicerina y lo que aconteció con la capa superficial estuvo exactamente de acuerdo con las predicciones teóricas de Vening Meinesz. La capa superficial plástica, arrastrada por las corrientes opuestas,



Fabricando un "tectógeno" con su "geosinclinal" sobre impuesto.

se hundió espesándose en la zona de "choque", alcanzando una profundidad estable y determinada para cada velocidad constante de las corrientes. Se hundió formando una verdadera "raíz" donde la capa plástica triplicó y hasta cuadruplicó su espesor. Pero en la superficie misma ocurrió algo muy interesante. Poco antes de la línea media de "choque" y a cada lado de ella, la capa plástica se elevó en una suave y amplia ondulación mientras que a lo largo de la línea que marcaba la conjunción de la capa se deprimió en un surco mediano bastante profundo. Esta es la "fosa geosinclinal", expresión superficial del "tectógeno" profundo, y así es como se origina (de acuerdo naturalmente a la teoría. Se ruega no creer todo a pie juntillas como si fuera comprobado y cierto).

Según la teoría de Vening Meinesz, pues, que cualitativamente anda a las mil maravillas, la fosa geosinclinal no es más que el reflejo, en la superficie de la Tierra, de la combadura de la "capa continental" arrastrada hacia abajo por las corrientes encontradas del substrato, que se espesa formando una raíz profunda. Y esta fosa, interpuesta entre dos amplias ondulaciones, es el receptáculo natural de los sedimentos. Allí van a parar y se acumulan los detritos provenientes de las islas vecinas y del continente, por la sencillísima razón de que, en virtud de la simple gravedad, los detritos tienden a migrar desde las partes altas del relieve terrestre a las más bajas. Y no hay partes más bajas que el fondo de estas fosas. (¿Dónde queda la escuela de los "neo-Hallistas" que creen que el geosinclinal se hunde debido al peso de los sedimentos que en él se acumulan?)

La fosa se origina así y los sedimentos se van acumulando a medida que el piso original de la depresión se hunde más y más. Pero llega un momento en que los sedimentos más antiguos, los más profundos, son también arrastrados hacia abajo, apretados entre el "sial" que se hunde. Los sedimentos se comprimen, se espesan, se pliegan en plena "fase cataorogénica" hasta que la compresión origina el levantamiento de la montaña media. Para saber porqué se eleva la montaña, basta apretar entre los dedos una masa de crema o un "éclair" de chocolate. La parte de la crema que se escapa no sufre mayores consecuencias, pero la que queda aprisionada entre nuestros dedos, la "raíz" profunda de los sedimentos geosinclinales apretados entre las masas siá-

licas y arrastrados hacia abajo a zonas de temperaturas elevadas, sufre serios trastornos y las rocas son metamorfizadas y granitizadas.

Y ahora dejan de actuar las corrientes y el "sima" se paraliza lentamente. De inmediato la raíz profunda de sial tiende a elevarse buscando un nuevo nivel de equilibrio isostático. Y esta tendencia se refleja en la "fase post-orogénica" del geosinclinal sobrepuesto al "tectógeno" que se eleva diferencialmente en bloques, llegando a su término el ciclo evolutivo.

La teoría es realmente magnífica y aunque cuantitativamente no anda muy bien, cualitativamente explica de manera elegante la aparición de la fosa geosinclinal, sus fases evolutivas y la razón de las "raíces de montañas" postuladas por Airy. Y la predilección que el metamorfismo y la granitización sienten por las fajas centrales de las montañas, como ya señalara Hall.

Pero, otra vez, la "teoría del tectógeno" nos plantea un nuevo problema. El del origen de las corrientes del substrato. El asunto comienza a hacerse un tanto monótono y esperemos que, esta vez, toquemos fondo. Y parece que, en verdad, la teoría más en boga necesita "tocar fondo" para explicar tales corrientes. Esta teoría considera a las corrientes del substrato como "convectivas".

Mis conocimientos culinarios son manifiestamente escasos. Y mi técnica deplorable, pues la última vez que intenté freír un huevo aquello fué una mezcla íntima e inseparable de clara, yema, cáscara y cuerpos extraños. Pero muchas veces he visto, en mis campamentos más lujosos, al cocinero preparar puchero. Y me he quedado absorto viendo cómo surgen, de pronto, de la profundidad misteriosa de la olla, trozos de papas, fideos, carne y garbanzos que, luego de danzar unos momentos en la superficie, vuelven a hundirse en el maremagnum. ¡Lástima que mis conocimientos de física alcancen justo para explicarme aquella maravilla casi mágica! Claro, el caldo se calienta en el fondo de la olla y asciende hacia la superficie en una corriente que arrastra consigo al enjambre de trozos sólidos. Al llegar a la superficie la corriente se abre en flor y el caldo se enfría por radiación. Y entonces baja a la profundidad invirtiéndose el sentido del movimiento. Al bajar se calienta y otra vez arriba. Es una manera de llevar calor, de transportarlo física y mate-

rialmente desde la zona caliente del fondo donde la llama enciende la olla, hasta la más fría de la superficie en contacto con el aire y de irradiarlo desde allí a la atmósfera. Es una corriente continua que perdura mientras perdura el caldo y la diferencia o "gradiente" de temperatura (en este caso considerable) entre fondo y superficie.

Es cuestión ahora de transportar nuestro puchero a la Tierra. Esta fué lo que hizo Griggs de manera formal y elaborada en 1939, encontrando que, para poder revolver el puchero terrestre con corrientes convectivas, es necesario que éstas se originen muy abajo, quizá en unos 3.000 kilómetros de profundidad, asciendan a la superficie, corran por un trecho paralelas a la misma y vuelvan a hundirse en busca de más calor. Porque si no vamos hasta allá abajo, casi hasta "tocar fondo", la diferencia de temperatura entre la zona inferior y la superior — entre el fondo de la olla y la superficie del caldo —, no es suficiente como para iniciar o mantener tales corrientes.

La teoría de las corrientes convectivas, pues, postula que estas corrientes afectan a todo el interior de la Tierra por lo menos hasta el "núcleo" interno, o sea hasta unos 3.000 kilómetros de profundidad, y sostienen que la fuente de energía que las origina no es más que el calor interno de nuestro planeta. Y como éste es heredado del sol según las teorías cosmogónicas modernas (y antiguas), es evidente que las montañas, en el fondo, son simples productos de la energía solar...

Como teoría es, otra vez, magnífica. Sólo que hay varios peros, bastante molestos por cierto. Un primer pero estriba en el hecho de que el puchero es líquido pero el interior de la Tierra, al menos hasta los 3.000 kilómetros de profundidad, no está precisamente en estado líquido. En realidad no sabemos muy bien en qué estado está allí la materia porque, en el fondo, el problema es el de definir previamente qué entendemos por líquido, sólido, rígido, plástico o viscoso. Pero, de cualquier manera, no está en estado "líquido-pucheril", si se me permite el neologismo. Tomando en cuenta el hecho de que las ondas transversales producidas por los terremotos se transmiten al menos hasta los 3.000 kilómetros de profundidad a través de estos materiales y que los datos sismológicos dicen que alcanzan mayor rigidez que la del acero, podemos concluir, al menos pro-

visoriamente, que los materiales están bastante sólidos. Y eso de "corrientes convectivas" en sólidos ya no suena tan bien. Sin embargo, estos sólidos sometidos a altas presiones y temperaturas elevadas hacen cosas raras y pueden fluir plásticamente o deformarse de aun otra manera que Griggs ha llamado "flujo pseudo-viscoso" o "reptación sólida". El mecanismo del flujo pseudo-viscoso es bastante complicado pero lo interesante es que existe en realidad y no es un puro invento teórico. Griggs hasta ha medido la velocidad de este flujo en calizas sometidas a presiones confinantes del orden de 10.000 atmósferas.

El "flujo pseudo-viscoso" viene, pues, a salvar el primer escollo y aunque no nos deje completamente satisfechos, lo aceptamos en vista de que es tan poco lo que sabemos acerca del comportamiento de los materiales en el interior de la Tierra que bien podría ser cierto.

El segundo pero está en las "discontinuidades" del interior de la Tierra. Los datos seismológicos señalan, por la velocidad de transmisión de las ondas elásticas provocadas por los terremotos, que en el interior del planeta existen varias superficies de discontinuidad y seguir tan campantes en su viaje de ascenso o en su regreso descendente. La corriente viene ascendiendo y los materiales tienen una densidad determinada. Al aproximarse a los 1.000 kilómetros de profundidad, por ejemplo, los materiales empiezan a disminuir de densidad, lo que significa que, para conservar la misma cantidad de materia, se expanden en volumen. Bueno. Es perfectamente posible dice Griggs. Si las discontinuidades son debidas a cambios en la compresibilidad con la presión o a transiciones polimórficas de los materiales, no serían obstáculos para corrientes de densidad que las atravesarían sin sufrir modificaciones apreciables.

Perfectamente. Aceptemos que las corrientes convectivas son capaces de despreciar olímpicamente a las discontinuidades y de atravesarlas como si tal cosa. Total, ya hemos aceptado tanto que un poco más no nos hará mucha mella.

Pasemos al tercero pero. Este es bastante más serio pero Griggs, con ingenio casi demoníaco, se las ha arreglado para encontrarle la vuelta. Casi. La corriente convectiva del puchero, como toda corriente convectiva bien aducada, comienza a funcionar cuando el fondo de la olla se ha calentado en exceso de

un límite dado. El caldo del fondo, al calentarse más, se hace menos denso que el de la zona superficial y se produce un estado de inestabilidad que, a la menor provocación, da origen a la corriente. Y mientras las condiciones de calor en la base y enfriamiento en la superficie perduren, la corriente sigue funcionando.

En la Tierra la fuente de calor es constante y el aparato de refrigeración también y resulta, pues, difícil imaginar cómo y porqué se inicia una corriente, perdura durante algunos millones o decenas de millones de años y finalmente se inmoviliza. Para volver a originarse más tarde en el mismo lugar o poco menos, como si actuara cíclicamente. Con fuente de calor constante no es fácil producir corrientes convectivas periódicas. Pero Griggs no se inmutó ante detalle tan insignificante y diseñó un aparato ingenioso que le permitió demostrar que, con fuente de calor constante y sistema de refrigeración también constante, se puede producir verdaderas corrientes periódicas. Tomó un tubo y lo dobló formando una especie de marco cuadrado, casi simétrico. En el tramo horizontal inferior puso un calentador y en el horizontal superior un refrigerador. Hizo uno de los lados verticales algo más largo que el otro, doblando el tubo en una especie de codo o lazo, y en el lado opuesto, más corto, colocó una válvula. Al calentar el agua dentro del tubo nada ocurre al principio hasta que llega un momento en que desarrolla fuerza suficiente como para abrir la válvula. En cuando ésta se abre la corriente convectiva se inicia y se acelera rápidamente, llega luego a un máximo y decrece en intensidad hasta paralizarse. La válvula se cierra y vuelve a quedar todo quieto durante unos minutos hasta que de pronto la válvula se abre de nuevo y vuelve a iniciarse una corriente idéntica a la anterior. No hay duda que aquí, con fuente de calor constante, tenemos una corriente convectiva periódica. Pero: ¿dónde está la válvula en el interior de la Tierra? ¿Y dónde el brazo descendente más largo que el ascendente?

Griggs cree que un posible mecanismo de "iniciación-paralización" en la Tierra sería el de transferencia de masas frías y calientes. "Si el flujo de la corriente es más rápido que el enfriamiento por conducción, el material de la columna ascendente será llevado hasta la descendente antes de que tenga tiem-

po de enfriarse por conducción y, de modo similar, el material enfriado de la columna descenderá pasará por debajo y será llevado a la columna ascendente antes de que tenga tiempo de calentarse por conducción". Esta transferencia de masas frías y calientes disminuiría la fuerza motriz de la corriente que podría incluso llegar a paralizarse. Para que esto ocurra la corriente debería ser muy veloz, porque sabemos positivamente que la conductibilidad térmica de los materiales en el interior de la Tierra aumenta rápidamente con la profundidad y alcanza valores altos cerca del "núcleo", y sería muy difícil que no se calentaran "allá abajo" antes de ser arrastrados hasta la rama ascendente de la corriente. Y con flujo pseudo-viscoso de la corriente "sólida" es dudoso que ésta pueda alcanzar velocidades considerables. Gutenberg ha dicho que, para poder apreciar el flujo del material del "núcleo" terrestre, bastante menos "sólido" que el del manto por arriba de los 3.000 kilómetros, deberíamos esperar cosa de unos 100 años. Una tortuga, comparada con esto, alcanza velocidades supersónicas.

Hay todavía otro pero que, en el fondo no es tal. Pero que es bastante molesto por su secuela. Si estas corrientes convectivas han actuado y actúan hoy en la Tierra hasta los 3.000 kilómetros de profundidad, entonces los materiales que constituyen la espesa zona del manto que recubre al "núcleo" más interno deben ser bastante homogéneos y más o menos los mismos en todas partes. Esta conclusión evidente está un tanto reñida con el "modelo" de la Tierra que habitualmente imaginamos, pero eso no es óbice para que no pueda ser válida y cierta. Pero resulta un tanto molesto eso de tener que enfocar todas las cosas de nuevo bajo ángulo distinto.

El último pero es el de la distribución en el espacio y en el tiempo de los geosinclinales y, por ende, de los tectógenos y, por ende, de las corrientes convectivas. Y fuerza es confesar que aquí Griggs, geofísico que nos había dejado turulatos encontrando una oportuna explicación para todo, nos deja un tanto escépticos y desencantados cuando intenta aplicar la teoría a casos geológicos concretos. Porque a fuer de tomarse algunas licencias con los datos geológicos y manejarlos un tanto a *piacere*, todo es un agrandar corrientes y achicar corrientes, iniciarlas, acelerarlas y paralizarlas. E iniciarlas de nuevo en otra

parte. Es como si después de un pasaje geométrico y casi matemático de Bach se deshiciera todo en un *ad libitum* Chopiniano. A los geólogos nos gustaría oír Bach no solamente en geofísica sino en geología, pero sin duda la culpa es nuestra porque aún no hemos aprendido ni siquiera nuestro Offenbach.

La "teoría de las corrientes convectivas" no es, en su forma actual excesivamente satisfactoria, pero sabemos tan poco acerca de las condiciones en el interior de la Tierra que quizá alguna modificación futura la haga más plausible y cuantitativamente más aceptable. Pensemos que si Kühn y Rittmann tienen razón al postular una temperatura del núcleo interno de la Tierra del orden de 12.000 grados, en vez de los 3.000 que sugiere Gutenberg, entonces no sería necesario ir tan abajo para cerrar el circuito de las células convectivas y unos cuantos de nuestros "peros" desaparecerían. Y parece prudente cerrar este capítulo con un "acorde en re menor", muy de acuerdo con la humildad y cautela que nos conviene desplegar ante el convencimiento de nuestra monumental y supina ignorancia.

XI

ESPACIO Y TIEMPO

Con teorías uniformitarias y a veces sin ellas, podemos llegar a desentrañar la génesis, el modo de origen, el "cómo se formó" una roca que vemos aflorar en la falda de una montaña. Podemos saber que esa arenisca, dura y tenaz, se acumuló como arena en el fondo del mar y hasta saber si el lugar donde se depositó estaba cerca o lejos de la costa y si la profundidad era poca o mucha. Podemos deducir que aquella otra roca, caliza por ejemplo, representa un antiquísimo arrecife de coral y que el conglomerado de más allá fué acumulado en pleno ambiente continental al derretirse el hielo de un glaciar.

Podemos reconstruir, partiendo de sus resultados, los procesos geológicos del pasado. Los que construyeron rocas, los que las modificaron y las destruyeron. Los que construyeron montañas, las erodaron y las arrasaron. Pero las cosas no acaban allí. No es solamente cuestión de explicar la hegemonía de Macedonia en épocas de Filipo y Alejandro por el oro de las minas del Pangeo ni la Revolución francesa por los escritos de los enciclopedistas. Es necesario ubicar los "acontecimientos" en la trama del tiempo físico y saber que los discursos de Dantón vinieron algo después que las expediciones de Alejandro. Es necesario saber no solamente dónde sino cuándo se depositó aquella arena en el mar, cuándo la caliza y cuándo el conglomerado. En geología el asunto es, lamentablemente, bastante difícil y complicado.

En Historia humana la cosa es, por lo común, sencillísima.

¿Queremos saber dónde y cuándo escribió Napoleón una carta a Josefina? Pues nada más fácil que leer dónde y cuándo la fechó de puño y letra. ¿Queremos saber cuándo erigió Tutmoses los obeliscos de Alejandría y Heliópolis que están hoy absurdamente fuera de lugar en Londres y Nueva York? Pues no hay más que leer los jeroglifos y traducir las fechas al calendario gregoriano (olvidémonos que los egiptólogos no están muy de acuerdo con las fechas). Es que en materia de Historia humana los acontecimientos pasados están *fechados* por monumentos y documentos contemporáneos. Por documentos *escritos*. Y cuando, remontándonos en el pasado llegamos a épocas anteriores al invento de la escritura en los distintos pueblos o países, nos hundimos en la incertidumbre de la Prehistoria y ya no podemos *fechar* los acontecimientos con exactitud, ubicarlos correctamente dentro del marco, trama, retículo o lo que fuera del tiempo físico sino sólo — y a veces no siempre —, ordenarlos en su correcta *sucesión* en el tiempo.

La geología es pura prehistoria. No hay ningún documento escrito en el pasado geológico. Ningún animal aprendió a escribir, aunque, para ser correctos, debemos admitir que uno lo hizo. Pero aprendió hace tan poco tiempo que sus escritos, geológicamente, no nos interesan en absoluto. No tenemos, pues, más remedio que intentar dilucidar el orden, la sucesión de acontecimientos, dejando para más adelante el fecharlos exactamente, es decir, ubicarlos exactamente en la trama del tiempo.

Bueno, pero ¿cómo se hace? ¿Cómo podemos saber que esa arenisca es anterior o posterior a la caliza o al conglomerado? ¿Cómo saber que Dantón vino después de Alejandro? Porque no hay nada intrínseco en Dantón o en Alejandro, nada en su constitución interna, que lo haga al uno más “joven” (geológicamente) que al otro. Y nada hay tampoco en la arenisca, la caliza o el conglomerado.

Empezamos con el viejo profesor de anatomía de Florencia, Steno. Quién dijo, sobre poco más o menos: “Si tengo dos libros, uno en la mano izquierda y otro en la derecha y pongo uno sobre la mesa y después el otro encima, nadie podrá negar que el que puse encima lo puse después”. Ni Perogrullo.

Si tenemos dos capas o camadas, dos “estrados” de sedimentos superpuestos, el estrato o la camada inferior fué depositado

antes que el estrato o camada superior. Es en una palabra, más viejo, más antiguo. Supongamos que un río trae materiales que vuelca en un lago. El río, en creciente, arrastra considerable cantidad de rodados y arena que, al llegar a las aguas tranquilas del lago, se depositarán formando una camada, una capa o “estrato” de algunos decímetros de espesor. Una nueva creciente, días o años más tarde, acumula otra capa directamente sobre la primera. Es evidente que esta última es más “joven” que la anterior. Pero el hombre tardó muchos años en descubrir esto que hoy nos parece una “verdad de Perogrullo” porque necesitó, previamente, darse cuenta del mecanismo, del proceso genético de las capas sucesivas. Mientras creyó que todas las rocas se habían decantado del agua durante el Diluvio Universal, ni sospechó siquiera que podría formularse lo que llamamos hoy “regla de la superposición estratigráfica”.

Después viene el agrimensor de Somerset, William Smith. Quien descubrió que los fósiles podían utilizarse no solamente para adornar vitrinas de museos sino para individualizar los estratos. Y esto requiere un poco más de análisis.

En primer lugar llamamos “fósiles” a los restos de organismos, animales o plantas, que han vivido en el pasado. O a las impresiones dejadas por tales restos. Normalmente sólo se conserva las partes “duras” de los organismos, conchillas de moluscos, caparazones de crustáceos, huesos de vertebrados, troncos de árboles, por lo común “cambiados” en su constitución original o “petrificados”, como se dice a veces.

Supongamos una pacífica vaca. Tiene hambre y sed, la pobre, porque hace tiempo que no llueve y los pastos están secos. De pronto ve en lontananza una hermosa vega, verde de césped, húmeda. Y trotta alegremente en su busca sin darse cuenta de que se trata de una ciénaga. Entusiasmada con el tierno pastito se va adentrando poco a poco en el verde oasis, que en el fondo no es más que una trampa para cazar vacas. Y de pronto, ¡horror!, no puede salir. El suelo cede, se empanatana, patalea, muge y exhausta cae finalmente “para no levantarse más”. Telón. En cuanto la vaca pasó a mejor vida — y a veces aun antes —, comienza su destrucción. Depende, naturalmente, de donde hayamos ubicado la vaca pero si no hay cuervos, hay buitres o cóndores para darse el festín. Y luego acuden

al banquete toda una serie de bichos más chicos, desde gusanos a microbios, que dan buena cuenta de lo que dejaron los grandes. El aire y el agua se encargan del resto y pocos meses después los huesos están tan limpios como piezas anatómicas. Duros y formados por fosfatos de calcio, los huesos resisten la voracidad de los animales y de la intemperie, pero si quedaran mucho tiempo expuestos al aire aun ellos se reducirían a polvo. Pero supongamos que antes que esto ocurra vuelvan las lluvias ("a buena hora", diría la vaca). Los arroyos y ríos de la comarca se hinchan en creciente e inundan nuestra vega depositando sobre su superficie medio metro de limo y arcilla. Al volver los arroyos a la normalidad, queda en seco la antigua vega. Y los huesos de nuestra vaca enterrados bajo medio metro de "depósitos fluviales". Nuevas crecientes pueden acumular nuevos materiales y enterrar cada vez más profundamente los despojos mortales de la vaca. Pero, al mismo tiempo, algo les está sucediendo a los huesos. Las aguas que percolan lentamente a través de los sedimentos que los envuelven, van disolviendo las sustancias orgánicas de los huesos y depositando en su lugar, molécula a molécula, sustancias minerales, por lo general sílice amorfa. Los huesos están siendo "petrificados", convertidos en piedra, pero reproduciendo exacta y fidelísimamente las estructuras y características originales. Y una vez "petrificados" corren ya poco riesgo de ser destruidos.

A veces las aguas percolantes disuelven los restos sin depositar nada en su lugar. Dejan un hueco que señala dónde estuvo el resto y, en el sedimento endurecido que lo envolvía, queda una marca, una impresión o "impronta" del mismo. Y eso es también un "fósil" aunque el resto en sí no exista más. Gran parte de las hojas de plantas fósiles se han preservado de esta manera, como delicadas impresiones en sedimentos originalmente arcillosos y blandos, hoy endurecidos y convertidos en lutitas tenaces y compactas.

El hombre tardó bastante tiempo en aprender que los fósiles eran fósiles, es decir restos de organismos que vivieron en épocas pasadas. Y bastante tiempo, aunque menos, en utilizar este nuevo conocimiento desde el punto de vista geológico. Vallisneri ya se dió cuenta, allá por 1720, que los estratos podían individualizarse por ciertos fósiles característicos que encerraban, pero

así como el descubrimiento de América por Leif de Brattahild no empequeñece la hazaña de Colón, tampoco el de Vallisneri empaña la gloria de William Smith. Pero en el año 1000 el mundo no estaba preparado para recibir un "nuevo mundo" ni en el de 1720 había geólogos para aprovechar la idea del médico de Padua.

Munidos de estas dos armas, la "ley de Steno" y la "regla de Smith" los geólogos del siglo pasado se lanzaron a la descomunal tarea de solucionar el rompecabezas terrestre, ubicando cada pieza, cada estrato, en su posición relativa en el tiempo. Lamentablemente eran geólogos europeos y todo comenzó en Europa. Y digo lamentablemente porque el resultado final de aquellos esfuerzos hubiera sido mucho más satisfactorio si el trabajo hubiera comenzado en una región más normal y más representativa de las condiciones medias de la Tierra.

Pero tuvo que ser Europa. Que siempre fué el mismo caos de islas, golfos, penínsulas, montañas, mares internos y lagos que es hoy día. Y la mayor parte de las zonas que hoy llamamos "clásicas", es decir aquellas que sirvieron de patrón para todo el mundo, se encuentran en una angosta faja que va desde el país de Gales hasta el sur de Alemania. Allí los geólogos ingleses, franceses y alemanes se pusieron a desentrañar la "sucesión estratigráfica" expuesta en diversas regiones, para combinar luego los resultados en una sola "columna estratigráfica" que sirve de patrón "standard" internacional aun en nuestros días.

En Gran Bretaña, por ejemplo, Sedgwick estudiaba en las primeras décadas del siglo pasado el norte de Gales mientras Murchison hacía lo propio en aquella zona de Inglaterra que limita con el país de los bardos. Sedgwick progresaba de noroeste a sureste y encontraba una sucesión de estratos, caracterizados por una serie de fósiles, por una "fauna" especial, que le permitía distinguir el conjunto de capas como una unidad a la que llamó "Sistema Cámbrico", ya que Cambria era el nombre que los romanos dieran a Gales. Su buen amigo Murchison progresaba de sureste a noroeste en la vecina Inglaterra y distinguía otra sucesión potente de capas, con otra "fauna" distinta, a la que llamaba "Sistema Silúrico", derivando el nombre del de la vieja tribu de los Silures que tanto trabajo diera a los

romanos. El Sistema Silúrico era más joven que el Cámbrico. No había duda de que las capas de aquél descansaban sobre las de éste y, recurriendo a Steno y su "ley", la edad relativa era clara. Pero cuando los dos buenos amigos, progresando en sentidos opuestos, se encontraron en la zona fronteriza entre Gales e Inglaterra, ardió Troya. Los buenos amigos se convirtieron en furibundos enemigos y hasta el final de sus días se tuvieron un odio cordial y recíproco. Sedgwick decía que la parte inferior del Silúrico de Murchison era en realidad parte de su Cámbrico. Y Murchison afirmaba que Sedgwick estaba evidentemente trastornado porque lo que ocurría en realidad era que la parte superior del Cámbrico de Sedgwick no era más que su Silúrico. Años después Lapworth, con Salomónico juicio cortó el nudo gordiano creando, con el "Cámbrico Superior" de Sedgwick y con el "Silúrico Inferior" de Murchison un nuevo sistema, el Ordovícico, también derivando el nombre de otra belicosa tribu de la frontera galesa. Así se fué contruyendo, a tumbos y porrazos, el "patrón standard" de la geología histórica que, como bien dijera Rastall en un trabajo publicado poco antes de desaparecer, es un verdadero "desastre geológico".

Al principio todo fué algo confuso y todavía tenemos un poco de confusión heredada pese a que, analizando lo que hicieron nuestros gigantes padres, hemos adelantado bastante y aclarado las ideas. Hoy nos damos cuenta de que el problema fundamental de la Geología Histórica tiene tres facetas y que una sola cosa, única e indivisible, puede ser tres cosas distintas a la vez.

Tengamos un "estrato" cualquiera. Una capa de caliza que, como manto subhorizontal, aparece en una región determinada. Digamos que la capa tiene 20 metros de espesor y que asoma en las laderas de innumerables quebradas en una zona de 50 kilómetros de largo por 20 de ancho. Debajo de la caliza aparece otra capa, otro "estrato", formado por arenisca y arriba de ella aun otro, constituido por arcillas endurecidas.

Según la "ley de Steno" la caliza es más joven que la arenisca y más vieja que la arcilla, pero no nos interesa por el momento. Ahora somos simples ingenieros de minas utilitarios y nuestro interés en la caliza es puramente práctico y comercial. La compañía de cemento portland que nos paga el sueldo no tiene

inquietudes científicas e intelectuales. Quiere saber cuanta caliza hay disponible para calcular las reservas futuras de explotación. No le interesa saber como se acumuló la caliza, ni cuando, ni por qué. Sólo le importa saber cuanta hay y, naturalmente, si el material es apto para su fábrica. La capa de caliza es, pues, un simple cuerpo tridimensional que tiene largo, ancho y espesor. Es una "unidad de roca" y tales unidades suelen designarse con el nombre de "formaciones". Para distinguirlas unas de otras en regiones donde afloran varias distintas, les damos nombres específicos derivados de la toponimia local y decimos "formación (o caliza) San Juan", "formación Cerro Blanco", "formación Paraná".

Pero si de ingenieros de minas nos convertimos en geólogos y analizamos la caliza "filosóficamente" como hubieran dicho en el siglo pasado, es clarísimo que aquella capa es algo más que un simple cuerpo tridimensional. En primer lugar es obvio que la caliza se depositó en algún tiempo, época, período o lo que fuere del pasado. Y, lo que es aún más importante, que tardó un cierto tiempo en acumularse. La sedimentación de esa capa de caliza es un "acontecimiento" pasado y sabemos que el "acontecimiento instantáneo" es una abstracción del espíritu. Hasta la luz tiene velocidad. La caliza es, pues, cuando la analizamos científicamente, una "unidad de tiempo-roca", un cuerpo cuatridimensional que tiene ancho, largo, espesor y "tiempo transcurrido" durante su formación. Tal como nosotros mismos somos cuatridimensionales, pues nadie negará que mi largo, ancho y espesor actual son distintos de los que tenía yo hace unos 40 años.

Nuestra capa de caliza, como "unidad de tiempo-roca", representa pues un acontecimiento (acumulación de la caliza) ocurrido en un lugar determinado y durante un lapso específico que, teóricamente al menos, debería ser perfectamente ubicable en el retículo del tiempo pasado. Lo malo es que la caliza en sí no nos sirve para ubicar el acontecimiento en su lugar del pasado. Nada hay en la caliza misma que la distinga de otras acumuladas miles de años antes o miles de años después. Y aquí es donde intervienen los fósiles salvadores.

Por suerte estamos estudiando una región muy fosilífera y restos de organismos abundan no sólo en la caliza sino en la

arenisca que yace por debajo de ella y en la arcilla que la cubre. Y notamos que los fósiles de cada uno de estos estratos son distintos y característicos y que en todas partes donde aflora la caliza, por ejemplo, encierra siempre restos de los mismos organismos. Tal como dijera William Smith. La arenisca de abajo contiene, digamos, restos pertenecientes a 15 ó 20 especies distintas de animales marinos: caracoles, ostras, almejas. La caliza también encierra caracoles y ostras, pero distintos, junto a restos de corales y esponjas. Y la arcilla contiene muchas impresiones de hojas y algunos troncos "petrificados". Son estas "faunas" y "floras paleontológicas", asociaciones de restos orgánicos encerrados en un mismo estrato y pertenecientes a animales o plantas que vivieron al mismo tiempo. Para caracterizarlas brevemente elegimos la o las especies más conspicuas, más frecuentes o más exclusivas de cada asociación y hablamos de la "fauna del caracol A", la "fauna del coral B" y la "flora de la planta C". Y al espesor de estratos, al conjunto de capas caracterizado por encerrarlas, llamamos "zona del caracol A, del coral B, de la planta C". Nuestra "formación", nuestra caliza tridimensional, se nos ha convertido en una "zona" cuatridimensional, en una "unidad de tiempo-roca" caracterizada no por el acontecimiento sedimentario (acumulación de la caliza) sino por otro acontecimiento, biológico, que ocurrió al mismo tiempo. Caracterizada, en una palabra, por restos de organismos que vivieron durante el lapso, época, edad, período o lo que fuere durante el cual se acumuló la caliza.

Supongamos ahora que, munidos de nuestro martillo de geólogo, recorremos la zona donde la caliza aflora. Hemos andado ya 40, 50 kilómetros y siempre encontramos la misma caliza con los mismos fósiles. Pero ahora, siguiendo un poco más allá, comenzamos a notar leves cambios en la constitución de la caliza. Poco a poco, a medida que nos alejamos de la zona inicial de estudio, la caliza se hace más y más arenosa. Finos granos de cuarzo comienzan a aparecer, cada vez en mayor abundancia y la caliza se convierte primero en una "caliza arenosa" y luego en "arenisca calcárea". Más allá todavía el contenido en carbonato de calcio decrece rápidamente hasta que la roca pasa a una arenisca "normal", formada casi exclusivamente por gránulos de cuarzo. Pero, curiosamente, la roca cambiante sigue

encerrando los mismos fósiles, los mismos restos de organismos marinos. Quizá alguna especie ha desaparecido y quizá alguna otra ha venido a reemplazarla, pero en conjunto la "fauna del coral B" sigue siendo la misma. Seguimos en la "zona del coral B" pese a que la arenisca "normal" es completamente distinta de la caliza y aflora a más de 80 kilómetros de aquella. No podemos sino concluir que ambas rocas — y todos los tipos intermedios que hemos encontrado por el camino —, son contemporáneas, fueron acumuladas durante el mismo intervalo, ya que encierran los mismos fósiles.

¿Qué pasa? Pues lo mismo que pasa en el mar actualmente. Aquí vemos un río desembocar y descargar arena gruesa que se acumula en un delta. Siguiendo la costa vemos, poco más allá, playas donde el mar mismo acumula arenas finas. Y más allá aun grandes extensiones pantanosas donde, como en Bahía Blanca o en la ensenada de Samborombón, se acumulan barros con alto contenido de materia orgánica en descomposición. Todos estos sedimentos son contemporáneos y, por lo tanto, pueden estar caracterizados por restos de los mismos organismos marinos aunque con las diferencias propias de cada "ambiente", ya que no todos los animales marinos pueden vivir indistintamente sobre un fondo de arena o de barro. Las diferencias en los sedimentos no son más que "facies", aspectos locales de un todo único, debidos a condiciones distintas de acumulación.

Claro que se da también el caso inverso. En nuestro primer ejemplo vemos una caliza pasar lateralmente a una arenisca por cambio de "facies" sin que cambie la fauna que encierra. Pero puede ocurrir lo contrario: que cambie la fauna sin cambiar el carácter del sedimento. Supongamos que comience a hundirse lentamente el continente sudamericano y que el mar invada lentamente la ancha cuenca del Amazonas o los llanos extrandinos que se extienden de Buenos Aires a Mendoza. Y supongamos que el mar tarde un millón de años en alcanzar el pie oriental de los Andes a partir del momento en que se inicia el avance, acumulando en la cuenca del Amazonas o en los llanos argentinos un manto continuo de arenas. Admitamos que el carácter de estas arenas, de este manto de sedimentos, sea más o menos el mismo en todas partes. Los geólogos del futuro reconocerían una típica "formación" tridimensional de arenas ho-

mogéneas, pero al estudiar los fósiles que encierra, llegarían a la sorprendente conclusión de que esta formación, pese a ser homogénea e idéntica a sí misma en todas partes, tiene "distinta edad" en distintos lugares. Recorriendo la formación en sentido paralelo al de la costa del mar, en nuestro caso más o menos de norte a sur, pisarían rocas de la misma edad caracterizadas por los mismos fósiles. Pero al recorrerla de este a oeste, en dirección normal a la de la costa y paralela a la del avance del mar sobre el continente, verían cambiar los fósiles, las asociaciones, las "faunas" que encierra. Y es lógico que ocurra, porque los sedimentos depositados al pie de los Andes fueron acumulados un millón de años después de los de la costa actual al comenzar la invasión marina. En este caso la "facies" es constante pero la edad es distinta y, más que nunca, es evidente que estamos en presencia de una "unidad de tiempo-roca" de cuatro dimensiones.

Pero hay algo más. Si a la "unidad de roca" le hemos añadido el tiempo para convertirla en "unidad de tiempo-roca", a esta última le podemos quitar la roca y convertirla en "unidad de tiempo". El tiempo —lapso, intervalo, período, edad, lo que fuere—, durante el cual se depositó aquella unidad de roca. Y es por eso que un estrato representa tres cosas a la vez: un cuerpo físico puramente tridimensional ("unidad de roca") un cuerpo cuatridimensional cuando tomamos en consideración el tiempo gastado en formarlo ("unidad de tiempo-roca") y un intervalo "puro" que representa la longitud del tiempo transcurrido mientras se formaba ("unidad de tiempo").

Claro es que sólo las "unidades de tiempo-roca" son conceptos realmente geológicos. Las unidades de roca serán conceptos petrográficos, utilitarios o qué se yo, pero sin el *tiempo* no tienen ubicación en la Geología Histórica puesto que no hay historia sin tiempo. Y las "unidades de tiempo" tampoco son geológicas. Serán conceptos cronológicos, de división abstracta y pura del tiempo, pero si no "ponemos algo" en esas divisiones del tiempo pasado, si no hacemos concretas las divisiones abstractas, no tienen otro sentido que el de simples y puros intervalos perdidos en el flujo continuo del devenir. Tan abstractos como el intervalo "7-8 horas de la mañana, 12 de octubre de 1492". Porque esa hora cobra significado sólo cuando

recordamos el grito de "¡Tierra! ¡Tierra!". El "tiempo puro" no es concepto histórico, ni humano ni geológico. El concepto histórico surge cuando ubicamos un acontecimiento en el espacio y en el tiempo, cuando combinamos los tres factores y no cuando los manejamos separadamente. Claro que existe un "Renacimiento" como existe una "Edad Media" en el sentido de intervalo, de período de tiempo bien definido, que va de una fecha a otra. Pero no es menos cierto que cuando decimos "Renacimiento" o "Edad Media" no nos representamos intervalos abstractos sino que *evocamos* un conjunto de acontecimientos ocurridos en *Europa* que definen esos períodos. Es perfectamente correcto y legítimo decir que Colón "fué un hombre del Renacimiento", pero de Moctezuma sólo podemos decir que "fué contemporáneo del Renacimiento (europeo)" porque trasladar a México precolombiano el concepto de Renacimiento sería un absurdo descomunal.

Porque Colón y Moctezuma pertenecen a dos "provincias faunísticas" distintas y valga la libertad que me tomo con la expresión. La "fauna humana europea" del Renacimiento era muy distinta de la que, por esas mismas fechas, vivía en Tenochtitlán. Como es distinta la fauna actual de marsupiales que vive en Australia de la fauna africana con sus leones, elefantes, y antílopes o de la sudamericana con sus guanacos, armadillos y tapires. Como es distinta la "fauna marina" de los cálidos arrecifes de coral de la Polinesia de la que vive en la fría corriente de Humboldt que baña las costas pacíficas de Sud América.

Esta diversidad de "provincias faunísticas" y "florísticas" introduce una nueva dificultad en geología. Podemos tener rocas iguales con los mismos fósiles. Y rocas distintas con los mismos fósiles. Y, precisamente porque tienen los mismos fósiles, concluir que tienen "la misma edad", es decir, que fueron acumuladas más o menos al mismo tiempo. Pero también podemos tener rocas iguales con distintos fósiles y hasta rocas distintas con distintos fósiles. Y aquí ya no podemos concluir, sin más ni más, que por tener distintos fósiles tienen distinta edad. Puede que sí, puede que no y puede que quién sabe. Los fósiles pueden ser distintos porque realmente se trata de faunas de distinta edad, como en el caso de nuestra arena depositada por el mar durante una lenta invasión del continente. Pero pueden ser dis-

tintas simplemente porque pertenecen a dos distintas faunas que vivieron al mismo tiempo en distintas "provincias faunísticas" de la Tierra. Y el asunto se agrava cuando pensamos que los depósitos formados en un continente han de encerrar fósiles distintos que los acumulados por el mar en sus cercanías, ya que las faunas continentales y las marinas, por más coetáneas que sean, son más vale distintas.

El asunto, sin embargo, no es tan negro como parece pues, por suerte, siempre ha habido organismos más o menos "cosmopolitas" que se han sentido tan a gusto en las frías aguas polares como en las cálidas ecuatoriales. Es el migratorio Cortez quien nos permite correlacionar a los sedentarios Carlos V y Motezuma.

Los organismos que vivieron pegados al suelo, como las plantas y muchos animales marinos — entre ellos los corales, los lirios de mar, las anémonas —, son los que más muestran "diferenciación provincial" y a menudo simplemente "edáfica", es decir debido al suelo mismo sobre el cual viven. En cambio muchos libres, nadadores, voladores o infatigables caminantes, pueden transponer "barreras" climáticas o geográficas y pasar de una provincia a otra, como hacen hoy los tiburones en el mar o los chorlos, que todos los años migran desde la península de Labrador en el Canadá hasta las pampas de Buenos Aires y vuelta. Son los restos de estos organismos "cosmopolitas" los que nos permiten "correlacionar" faunas distintas y llegar a establecer que dos conjuntos de plantas o de animales totalmente diferentes vivieron a un mismo tiempo. Y, por ende, que las distintas rocas que los encierran fueron acumuladas en un mismo período.

Desde los tiempos de William Smith bastante agua ha corrido bajo los puentes y hemos aprendido muchas cosas que él apenas vislumbrara o no sabía. Y, sobre todo, entre Smith y nosotros está nada menos que Darwin y su escuela transformista que en verdad transformó los conceptos acerca de los seres vivos, presentes y pasados. Hoy sabemos por qué las faunas cambian con el pasar del tiempo y por qué se suceden unas a otras. Y sabemos que un determinado "estado evolutivo" se ha dado una sola vez y jamás se ha repetido. Los organismos, transformándose incesantemente, han ido diversificándose en formas más

y más complejas, más y más evolucionadas desde las remotas épocas, en que la vida elemental apareció sobre nuestro planeta. Y en cada período, en cada momento del largo pasado, el conjunto de los organismos vivientes, la "fauna" o la "flora" de ese instante, presentaba características propias nunca más repetidas pero "superadas" con el pasar del tiempo.

El estudio de los estratos y de sus fósiles característicos en Europa, teniendo en cuenta la "ley de Steno", la "regla de Smith", el concepto de "zona", el de "facies", el de adaptación edáfica y el de diferenciación provincial de los organismos, el de "correlación paleontológica" y las ideas evolucionistas, llevaron finalmente a formular un cuadro general, ensamblando distintas secciones expuestas en distintas comarcas. Y este cuadro, elaborado en Europa, sirve aún de base para todo el mundo. Sólo refiriéndonos a él podemos entendernos actualmente, aunque, a veces, no nos entendemos muy bien. Y, a veces, ni bien ni mal. Así hemos dividido la historia de la Tierra en grandes Eras, y estas en períodos, y los Períodos en Epocas y las Epocas en Edades y las Edades en Hemeras. Esto desde el punto de vista del "tiempo puro", que desde el de las "unidades de tiempo-roca" a los Períodos llamamos Sistemas, a las Epocas, Series, a las Edades, Pisos y a las Hemeras, Zonas.

Pero en la historia de la Tierra hay otros acontecimientos a más de los sedimentarios y biológicos. Estos nos han servido para establecer el "patrón cronológico", pero cabe ubicar en él a los demás, tanto o más importantes en sí pero que no contribuyen a elaborar aquella escala. Los acontecimientos erosivos volcánicos, "plutónicos" y diastróficos, englobando en estos últimos a todos los que tienen algo que ver con dislocaciones de la corteza terrestre.

Ubicar un acontecimiento volcánico en la escala cronológica es sencillo. Las rocas volcánicas no encierran fósiles, naturalmente, pero se encuentran intercaladas entre rocas sedimentarias fosilíferas y, conociendo la edad relativa de éstas, ubicamos aquéllas por lo menos dentro de ciertos límites de error máximo y mínimo.

También es fácil ubicar un acontecimiento diastrófico, pero aquí el error de ubicación, la incertidumbre entre la fecha máxima y la mínima en que pudo ocurrir es, por lo general, algo

mayor. Tengamos un conjunto de sedimentos acumulados casi horizontalmente en el fondo del mar encerrando numerosos restos fósiles característicos. Supongamos ahora que presiones laterales, actuando en la corteza terrestre, compriman la cubeta sedimentaria con todo su contenido. Los sedimentos se pliegan, se arrugan como un mantel sobre una mesa y pierden así su horizontalidad primitiva. Todo el conjunto, luego de comprimido, dislocado y plegado se eleva sobre el nivel del mar dando origen, quizá, a una faja montañosa. Los agentes atmosféricos comienzan de inmediato su obra de destrucción, atacando a los sedimentos emergidos, los erosionan, los desintegran y descomponen y los cursos de agua elaboran un relieve más o menos acusado o más o menos chato de acuerdo a circunstancias locales. Pasado un tiempo vuelve a hundirse nuestra zona y el mar la invade nuevamente depositando otro conjunto de capas subhorizontales que se apoyan sobre la superficie de erosión labrada en las capas inferiores plegadas. Tenemos aquí una "discordancia". Las capas del conjunto superior yacen "en discordancia" sobre las del inferior puesto que los planos estratigráficos de los dos conjuntos no concuerdan, no son subparalelos entre sí como lo son dentro de cada uno de los dos conjuntos individuales. Una discordancia de este tipo nos dice de inmediato que entre los dos periodos de sedimentación representados por los dos conjuntos de estratos, ha habido un período de movimientos tectónicos que dislocaron los depósitos más antiguos, seguido de uno de erosión que los destruyó en parte.

El estudio de estas discordancias ha demostrado que, en determinados períodos de la historia geológica, los movimientos tectónicos han sido más frecuentes, más intensos y más generalizados que en otros. Ha habido, en una palabra, períodos de verdaderas "revoluciones tectónicas" alternando con otros más largos de comparativa quietud o reposo de la corteza.

Pero estos "acontecimientos diastroficos", estas grandes revoluciones tectónicas que vinieron acompañadas por intensos procesos plutónicos de metamorfismo y granitización, sirven también para elaborar el cuadro cronológico general. En realidad no sirven para mucho, que digamos, pero cuando no tenemos más remedio, a falta de pan buenas son tortas. Los fósiles más antiguos conocidos, que merezcan el nombre de tales, datan

del Período Cámbrico, cosa de 500 millones de años sobre poco más o menos. Pero las rocas más antiguas que conocemos son casi cuatro veces más viejas. Grandes extensiones de todos los continentes, el interior del Brasil y las Guayanas, Canadá, el centro de Africa, de Australia y de Siberia, el macizo de Finlandia y Escandinavia, están constituídas por estas rocas pre-Cámbricas, completamente desprovistas de fósiles (o con algún escasísimo resto archiproblemático en las más jóvenes). Y estas rocas están, por lo común, altamente metamorfozadas y granitizadas. Nuestra guía más segura desaparece aquí y para poner un poco de orden en el caos y desentrañar la sucesión de acontecimientos sólo nos queda el recurso de estudiar las sucesivas "discordancias" que aparecen en una comarca más o menos extensa y elaborar patrones cronológicos locales sin muchas esperanzas de poderlos correlacionar estrechamente entre sí, ya que no tenemos manera alguna de demostrar la "universalidad" de los movimientos tectónicos que originaron aquellas discordancias.

Es por eso que la base del Cámbrico constituye un límite de primerísima categoría. De allí "para acá" tenemos fósiles y podemos subdividir la historia geológica de toda la Tierra bastante satisfactoriamente. De allí "para allá", hasta las rocas más antiguas conocidas, no tenemos fósiles y recurriendo sólo a los resultados de los procesos diastroficos y plutónicos apenas si podemos bosquejar, de manera bien poco satisfactoria por cierto, la historia geológica de regiones circunscriptas. Es sólo por un prurito de uniformar la terminología que llamamos a las dos Eras "pre-Cámbricas" que generalmente se aceptan (porque ni en materia de Eras estamos muy de acuerdo) "Proterozoica" y "Arqueozoica", de la "vida primitiva" y de la "vida arcaica", respectivamente, pese a que no sabemos cómo era la vida. ¡Y ni siquiera si la hubo en realidad!

El cuadro de la página siguiente muestra el "patrón standard" mundial con las subdivisiones internacionales hoy más o menos generalmente admitidas. Le he añadido, adelantándome a lo que será discutido en el capítulo siguiente, las "edades absolutas" determinadas con los procedimientos modernos basados en la radioactividad de ciertos minerales.

LA EDAD DE LA CRIATURA

Los orientales, pausados y contemplativos, fueron muy generosos con el tiempo. En el Manusmitri, libro sagrado de los hindúes completado en el siglo II antes de Cristo, se dice que todo el pasado, presente y futuro del mundo no es más que un "día" en la vida eterna de Brahma, día que dura 4.320 millones de años. Y según el calendario hindú del Vishnu Pûrana, hemos recorrido ya casi la mitad del "día" y nos hallamos (en este año de gracia de 1954) en el 1.972.949.053 desde la creación del mundo. Cifra tan cercana a la obtenida con los cálculos más ultramodernos que nos deja boquiabiertos ante tamaña coincidencia.

Los occidentales, en cambio, hemos sido mucho más avaros con el tiempo. Hasta bien entrado el siglo XIX casi todos creían a pie juntillas en la fecha de 4.000 años antes de Cristo que la Vulgata latina daba como la de creación del mundo. En los países de habla inglesa se aceptaba 4.004 años antes de Cristo, fecha que aparecía en las ediciones anuales de la Biblia publicadas por la Clarendon Press de Oxford. Claro que estas fechas no se encuentran ni por pienso en el texto del Génesis y no todos saben que los curiosos 4.004 años se derivan de los cómputos estrafalarios que hiciera Ussher, Arzobispo de Armagh, hacia mediados del siglo XVII. ¡Según Ussher el mundo fué creado el día 26 de octubre del año 4.004 antes de Cristo, a las nueve de la mañana!

Costó mucho trabajo desprenderse de estas ideas absurdas

y de estas fechas arbitrarias que habían pasado a convertirse en dogmáticas. Y fué Hutton quien asestó el golpe de gracia y liberó a la geología de este estrecho límite de tiempo, al decir que sus estudios le llevaban a no hallar "vestigios de un principio" en la historia terrestre. Pero como acontece a menudo, fué casi peor el remedio que la enfermedad y muchos admiradores de Hutton, sin entenderle cabalmente, pensaron en un tiempo ilimitado. De un tiempo ridículamente corto se saltó a uno fantásticamente largo, tan largo que se perdía en el pasado indefinido.

Y vino, como es lógico, la reacción que colocó las cosas en su justo medio. Fué Lord Kelvin quien la inició, partiendo de que si la Tierra está en proceso de enfriamiento, sería factible calcular el tiempo transcurrido desde la consolidación del planeta hasta la fecha estudiando el "gradiente geotérmico" actual. Y en 1862 llegó a la conclusión de que este gradiente, es decir el aumento de la temperatura con la profundidad observado en las capas altas de la corteza terrestre, hubiera tenido que ser mucho menor si la corteza se hubiera solidificado hace más de 400 millones de años y, por el contrario, mucho mayor si la consolidación (o "consistentior status" como Kelvin le llamara) hubiera acaecido hace menos de 20 millones de años. Este gran margen de incertidumbre se debió a la imprecisión e inexactitud de los datos con que contara y en 1897, luego de largas controversias científicas, fijó los límites posibles entre 20 y 40 millones de años. La física clásica del siglo pasado estaba lejos de sospechar la existencia de la radioactividad...

Poco después, en 1898, Joly intentaba un cálculo similar pero partiendo de una idea muy distinta. Hacía 175 años que el gran astrónomo Halley había formulado una "Proposición para Descubrir la Edad de la Tierra" sugiriendo que la cantidad total de sal podría servir para medir la edad de los océanos. Halley fracasó por falta de datos pero Joly llegó a cifras bastante precisas. La idea es sencillísima. Los océanos estaban formados, al principio, por aguas dulces y la salinidad que hoy tienen se debe a las sales que los ríos llevan constantemente al mar y allí se concentran. Si conociéramos la cantidad total de sales disueltas que los ríos conducen anualmente al mar podríamos calcular

fácilmente el número de años que han sido necesarios para llegar a la concentración actual de sal en los océanos.

Joly restringió el problema a uno solo de los elementos químicos que se encuentran en la sal marina, el sodio. Y aceptando que los ríos llevan anualmente al mar unos 160.000.000 de toneladas de sodio, calculó que se necesitarían unos 90 millones de años para concentrar la cantidad de sodio existente hoy en las aguas oceánicas, ya que esta cantidad es alrededor de 90 millones de veces mayor que 160.000.000. Poco después Sollas, analizando los datos, presunciones y conclusiones de Joly, llegó a fijar la "edad de la sal oceánica" entre 80 y 150 millones de años.

Cálculos más modernos han modificado sensiblemente estas cifras. En primer lugar hoy sabemos que casi todo el sodio que los ríos llevan al mar en forma de cloruro disuelto (sal común) es nada más que sal oceánica "pre-existente", ya sea arrastrada desde el mar a los continentes por los vientos y lluvias, ya derivada de depósitos salinos acumulados en otras épocas. Una vez deducida esta "sal preexistente", la cantidad anual de "sal nueva" que los ríos llevan al mar es de unas 60.000.000 de toneladas y es muy probable que esta cifra sea todavía excesiva. La cantidad total de "sodio marino" en el océano y en los sedimentos es de 15.000.000.000.000 (15 × 10¹⁵) toneladas y si asumimos que en el pasado geológico el aporte anual de sodio fué constante y que en un principio no existía sodio en el mar (cosa que no sabemos), la "edad aparente" de los océanos sería de unos 250 millones de años. Pero hay varias razones que nos inducen a pensar que esta cifra es un "minimum minimorum" y que la edad real de los océanos debe encontrarse entre cifras 8 a 27 veces mayores.

Es más que probable que el aporte anual de sodio al mar sea hoy mucho más elevado que en otras épocas. El fuerte relieve que caracteriza a la superficie terrestre actual, con sus grandes cordilleras como los Alpes, Himalaya y Andes (evidentemente mucho más pronunciado que lo que ha sido regla general en el pasado geológico), indica que la erosión actual y el acarreo de sodio al mar debe ser también mucho más intensa que en otras épocas. Y la actividad humana, agrícola e industrial, ha aumentado enormemente la velocidad de erosión en muchas regiones de la Tierra.

Estos cálculos han perdido importancia en la actualidad frente a los resultados de métodos muchísimo más exactos que, si bien todavía en plena elaboración, han dado ya frutos positivos. Son estos los métodos radioactivos.

Todo se debe, naturalmente, al descubrimiento de la radioactividad por Becquerel en 1898. Pero la aplicación de este proceso natural al problema de "medir la edad de la Tierra" vino mucho después. Fué Strutt (Lord Rayleigh) quien, en 1908, descubrió que el contenido de helio de los minerales radioactivos podía correlacionarse con su probable edad geológica. Desde entonces se ha hecho mucho para determinar la "edad absoluta" de distintas rocas y hoy existen varios métodos, que requieren análisis muy delicados con instrumental de alta precisión, pero que dan resultados muy satisfactorios (a veces). Los "clásicos" se basan en la desintegración del uranio y del torio, ya sea tomando en consideración el helio generado o los plomos radiogénicos finales. Más modernamente se han desarrollado métodos basados en la transformación del isótopo Rb⁸⁷ del rubidio en estroncio radiogénico Sr⁸⁷, en el isótopo C¹⁴ del carbono y en la transformación del isótopo K⁴⁰ del potasio en el isótopo A⁴⁰ del argón.

Hoy que la física atómica se ha hecho más popular que un vals de Strauss y más conocida que las rimas de Bécquer, todo el mundo sabe que el elemento químico uranio se desintegra espontáneamente dando, como productos finales, plomo y helio. Y que lo mismo hace el elemento químico torio. Pero el elemento uranio está constituido por dos isótopos de distinto peso atómico, químicamente idénticos, el U_I o uranio 238 (U_I o U²³⁸) y el actinouranio o uranio 235 (AcU o U²³⁵) que, en la actualidad y de acuerdo a las precisas determinaciones de Nier, se encuentran en la naturaleza en la proporción atómica AcU/U_I = 1/139,845, es decir que el uranio común está formado por 99,29 por ciento de U_I y 0,71 por ciento de AcU.

Cada uno de estos dos uranios, como así también el torio, da origen a un plomo distinto, idéntico al común por sus propiedades químicas, pero de distinto peso atómico. El U²³⁸ da plomo 206 (Pb²⁰⁶) luego de 15 transformaciones directas y dos "laterales" durante las cuales emite 8 "partículas alfa" que no son más que átomos de helio que han perdido dos electrones.

El U^{235} sufre 12 transformaciones directas y dos laterales, emite 7 átomos de helio y da origen al plomo 207 (Pb^{207}). El torio pasa por 11 transformaciones directas y una lateral perdiendo 6 átomos de helio y dando plomo 208 (Pb^{208}). La relación entre los "elementos padres" cabezas de las series y los resultados finales de las sucesivas transformaciones pueden escribirse así:

$$\begin{aligned} U^{238} &= \text{Plomo } 206 + 8 \text{ Helio} \\ U^{235} &= \text{Plomo } 207 + 7 \text{ Helio} \\ Th^{232} &= \text{Plomo } 208 + 6 \text{ Helio} \end{aligned}$$

Para complicar un poco más las cosas existe todavía otro plomo, el plomo 204, que no es radiogénico, es decir, que no es derivado de otro elemento (por lo menos en apariencia), idéntico en todos los demás aspectos a los tres ya mencionados. El "plomo común" es, por lo general, una mezcla de estos distintos isótopos.

Todo esto es muy interesante, pero lo que hace posible utilizar la radioactividad de estos elementos para medir la "edad de la tierra" es el hecho de que la velocidad de transformación de un elemento en otro es constante y propia para cada uno de ellos. Por "vida media" de un elemento radioactivo, entendemos el tiempo necesario para que la intensidad de la radiación que emite un fragmento disminuya a la mitad o, lo que es lo mismo, para que el peso del fragmento se reduzca a la mitad. Según las determinaciones más modernas, las "vidas medias" de los tres "elementos padres" ya mencionados son:

$$\begin{aligned} U^{238} &= 4,56 \times 10^9 \text{ años} \\ U^{235} &= 7,13 \times 10^8 \text{ años} \\ Th^{232} &= 1.389 \times 10^{10} \text{ años} \end{aligned}$$

Pero, un momento. ¿Es cierto que la velocidad de transformación de estos elementos, su "vida media", es constante y lo ha sido en el pasado geológico? Tenemos que estar bien seguros porque si no es cierto, estamos fritos. Por suerte es cierto y se lo puede probar con toda la exactitud posible. Cuando observamos bajo el microscopio, y con aumento poderoso, algunos minerales como mica o turmalina, suele verse que el mine-

ral presenta diminutas manchas, pequeñísimos anillos coloreados, que se llaman "halos pleocróicos". Y en el centro de estos anillos aparece un pequeñísimo cristalito de zircón o de otro mineral radioactivo incluido en la mica o la turmalina. En 1907 Joly demostró que estos halos son debidos a la radioactividad del cristalito central y que son producidos por el bombardeo de partículas de alfa (o átomos de helio, que es lo mismo) desde el cristalito en todas direcciones. La penetración de estos átomos de helio, es decir la distancia que pueden recorrer a través de un material cualquiera, depende del elemento radioactivo que los produce y de la densidad de la materia que atraviesan. Conociendo su penetración, su "alcance", en el aire, podemos calcular fácilmente que, en la biotita (o mica negra) los átomos de helio más penetrantes producidos por desintegración del uranio se alejarán apenas si 1/15 mm. del cristalito central y que, por lo tanto, el mayor diámetro posible de los halos pleocróicos debidos al uranio será de 1/30 milímetros. Los originados por desintegración del torio tendrán diámetro algo menor, de 1/25 milímetros. Y en efecto, mediciones muy precisas realizadas por Joly y, más modernamente, por Henderson entre 1934 y 1939, han demostrado que los diámetros máximos de los "halos pleocróicos" en la biotita concuerdan exactamente con los previstos teóricamente. Si la velocidad de transformación de los elementos radioactivos hubiera variado, tal coincidencia no se observaría y de allí podemos concluir que la "vida media" de estos elementos no ha sufrido modificaciones durante el largo pasado geológico. Por otra parte, sabemos que es imposible modificarla en el laboratorio y que es independiente de la temperatura o presión a que la muestra radioactiva esté sometida.

Pero todavía nos falta, para poder calcular la "edad" de un mineral radioactivo, conocer la velocidad o razón de la producción de helio a partir del uranio y del torio. Dos métodos existen en la actualidad: el primero, y más antiguo, entraña medir separadamente las cantidades de uranio y de torio presentes en una muestra y usar sus constantes de desintegración para calcular la razón a la cual se produce el helio. El segundo, más moderno, hace uso de instrumentos que permiten contar directamente el número de rayos alfa (es decir de átomo de

helio) que una fuente radioactiva produce en la unidad de tiempo. Pero no es cosa de meternos en honduras y de explicarnos sobre el asunto, bastantísimo más complicado de lo que suena. Contentémonos con saber que, para que un gramo de uranio genere un centímetro cúbico de helio se necesitan unos 8,8 millones de años.

Ahora la cosa es fácil (comparativamente). Supongamos que tenemos una muestra de mineral de uranio. Es cuestión de analizarla y medir cuidadosamente la cantidad de uranio (en gramos) y de helio (en centímetros cúbicos) que contiene por gramo de muestra. Y la "edad" del trozo queda dada por la relación He/U 8,8 millones de años, entendiendo por "edad" la fecha de cristalización o de formación del mineral analizado, cuando todo el uranio que contenía era uranio y no había nada de helio.

Pero el "método del helio" tiene sus graves inconvenientes. Para que el cálculo sea exacto no debe haberse perdido nada del helio generado por la desintegración del uranio, pero como el helio es un gas lo probable es que haya habido alguna pérdida, sobre todo porque su presión dentro del material que lo encierra puede alcanzar algunas atmósferas. Por eso el método del helio cayó en descrédito por más de 20 años hasta que Goodman y Evans lo resucitaron en 1941, demostrando que es perfectamente utilizable en ciertos casos, especialmente cuando se trata de medir la edad de rocas en las cuales existe pequeñas cantidades de materiales radioactivos.

Hoy se emplea, para determinar la edad de minerales ricos en estos elementos, el "método del plomo", o mejor "los métodos", porque son varios. Uno de ellos consiste en determinar las cantidades de uranio y de plomo que contiene una muestra, en vez de las de uranio y helio. Claro que para poder calcular la edad necesitamos saber ahora la velocidad o razón de producción de plomo a partir del uranio, pero sabiendo la del helio, ésta se calcula muy fácilmente. Hemos visto ya que una parte uranio 238 da origen a 206 partes de plomo en el mismo tiempo que a $8 \times 4 = 32$ partes de helio (porque emite 8 átomos de helio de peso atómico 4). Sabiendo, ahora, que un gramo de uranio genera helio a razón de un centímetro cúbico en 8,8 millones de años, es fácil ver que una tonelada de uranio

generará unos 1/7.400 gramos de plomo en un año. Así, pues, analizando la cantidad de uranio y de plomo radiogénico en la muestra, la "edad" del mineral queda dada por la fórmula $\text{Pb}^*/\text{U}_I \times 7.400$ millones de años. (Pb^* , con asterisco, significa "plomo radiogénico"). Claro que hay que corregir un poco la fórmula tomando en cuenta el plomo 207 derivado del actino-uranio, pero no importa. Pero sí que importa cuando, además de uranio, la muestra tiene torio, porque una tonelada de torio produce solamente unos 1/19.500 gramos de plomo 208 en un año. Si el mineral tuviera solamente torio como elemento radioactivo "padre", la edad estaría dada por la fórmula $\text{Pb}^*\text{Th} \times 19.500$ millones de años, fórmula que también podemos escribir $\text{Pb}^*/0,38 \text{ Th} \times 7.400$ millones de años, relacionando la constante del torio con la del uranio, porque 0,38 es igual a $7.400/19.500$ (o casi).

Para los minerales que contienen uranio y torio, la fórmula de la edad sería, pues:

$$\text{Edad} = \frac{\text{Pb}^*}{\text{U} + 0,38 \text{ Th}} \times 7.400 \text{ millones de años}$$

Claro que esta es una primera aproximación. La relación entre las constantes del uranio y del torio no es muy segura y la cifra 0,38 está sujeta a modificaciones a medida que los métodos se afinan. Además, es evidente que hay que corregir la edad teniendo en cuenta que la producción de plomo en un trozo cualquiera de mineral es hoy algo menor que en la época que siguió inmediatamente al momento de su cristalización, porque en ese entonces había más uranio y torio en la muestra que en la actualidad. Y cuanto más viejo el mineral, mayor será la corrección necesaria. Por último, el plomo de la fórmula es Pb^* , es decir "radiogénico", pero como en la muestra puede existir algo de plomo 204, es decir "no radiogénico", se hace necesario dosarlos separadamente para tomar en consideración sólo al originado por desintegración del uranio y del torio.

Y esto conduce a otros métodos del plomo, a los "métodos de la proporción de isótopos". Como los isótopos del uranio, U_I y AcU , tienen diferentes constantes de desintegración, las proporciones de sus productos finales $\text{Pb}^{207/208}$ han variado

sistemáticamente durante el pasado geológico y, analizando en la muestra las cantidades de estos dos plomos, se puede obtener una determinación independiente de la edad geológica del mineral.

En estos "métodos del plomo" hay poco riesgo de que el plomo en sí se haya perdido, ya que éste es un elemento muy poco "móvil". Pero en cambio existe siempre una cierta posibilidad de que parte del uranio "padre" haya sido lavado de la muestra y, lo que es más probable aún, que haya habido pérdidas de radón (Rn o radioemanación) y de actinón (An o actinoemanación), miembros gaseosos de la serie de transformaciones del U_I y del AcU que tienen "vidas medias" de 3,82 días y 3,92 segundos respectivamente. Y si hay torio en la muestra, de parte del torión (Tn o torioemanación), elemento igualmente gaseoso de la serie del torio, con "vida media" de 54,5 segundos. El radón es el sexto elemento que aparece en la serie de transformaciones del U_I y se origina del radio, que es el quinto, por emisión de un átomo de helio. El actinón ocupa igual posición en la serie del AcU y se deriva del actinio X mientras que el torión es el quinto elemento de la serie del torio y se deriva del torio X, que es el cuarto, por emisión de un átomo de helio. Y es evidente que, si ha habido pérdida de estos elementos gaseosos, la cantidad final de plomo radiogénico resultante, será menor que la debida.

Un novísimo método desarrollado hace pocos meses por Eckelmann, Broecker y Kulp de la Universidad de Columbia, hace a un lado con estos inconvenientes y con las posibles pérdidas de uranio padre y de los elementos gaseosos de las series. Consiste en tomar en consideración sólo la relación Pb^{206}/Pb^{210} . La concentración de plomo 206 se determina con espectrógrafo de masas, como en los demás métodos. Y la del plomo 210 (que es lo mismo que decir radio D, elemento número 11 de la serie del U_I) contando el "hijo" Pb^{210} (es decir radio F, originado del radio D por emisión de dos partículas beta) por centelleo alfa. Como el plomo 210 aparece después que el radón, no interesa que haya habido pérdidas de este gas. Ni del uranio "padre" que viene mucho antes, a la cabeza misma de la serie de transformaciones. Hasta ahora se ha hecho unas pocas

determinaciones de edad con este método que promete dar resultados mucho más exactos que los anteriores.

El "método del estroncio" es también muy moderno. Fué sugerido en 1937 por Goldschmidt pero sólo en 1949 Ahrens lo elaboró consiguiendo resultados positivos. Es especialmente adecuado para medir las edades absolutas de rocas muy antiguas, sobre todo pre-Cámbricas. Se basa en que el isótopo Rb^{87} del rubidio da estroncio Sr^{87*} radiogénico con emisión de una partícula beta. Como la "vida media" del rubidio es muy larga comparada con el tiempo geológico, sólo una parte insignificante del rubidio primitivo se habrá desintegrado aún en los minerales más antiguos y, por lo tanto, aquí no tenemos que introducir correcciones, como en el caso del uranio, que produjo más plomo al principio que en la actualidad. La "vida media" del Rb^{87} es de 58.100 millones de años, de acuerdo a las determinaciones hechas por Eklund en 1946, y como la constante de desintegración es igual a $0,693/T$ (siendo T la "vida media"), la edad de un mineral está dada por la fórmula:

$$\text{Edad} = \frac{\% Sr^{87*}}{\% Rb^{87}} \times 83.700 \text{ millones de años}$$

Este método ha dado resultados excelentes, pero todavía son pocas las determinaciones efectuadas con el mismo.

El "método del potasio-argón" está aún en plena elaboración. Se basa en la sugestión que hiciera Evans en 1940 de que el isótopo K^{40} del potasio se transforma en el isótopo A^{40} del argón por emisión de rayos gama. Como el potasio es elemento muy abundante este método puede llegar a ser interesantísimo y hasta es posible que con él se pueda, en un futuro no lejano, "fechar" rocas sedimentarias.

Por último, unas palabras sobre el "método del carbono 14". También es muy moderno y fué desarrollado por Arnold y Libby hace pocos años. Se basa en la proporción relativa del isótopo radioactivo del carbono, el C^{14} , con respecto a los demás isótopos de este elemento. Un árbol vivo, que absorbe anhídrido carbónico del aire, tiene, en su madera, la misma proporción de isótopos del carbono que la que se encuentra en la atmósfera. Pero cuando el árbol muere, el carbono 14,

que es radioactivo empieza a disminuir con respecto a los demás y, conociendo la "vida media" de este isótopo se hace posible "fechar" cuándo murió el árbol. Pero la "vida media" del carbono 14 es muy corta y el método sirve sólo para fechar cosas comparativamente recientes, ocurridas hace unos 20.000 o 30.000 años como máximo. Sin embargo, parece que refinamientos modernos del método extenderán su alcance hasta unos 100.000 años, pero, aún así, tendrá poca importancia geológica.

Todos los métodos ideados hasta el presente sirven para datar la cristalización o formación de minerales que contengan elementos radioactivos y, por consiguiente, para fechar las rocas que los encierran. Pero solamente las rocas volcánicas o plutónicas, porque solamente en ellas la fecha de cristalización de los minerales coincide con la de formación de la roca. En los sedimentos, por el contrario, los minerales pueden ser mucho más "viejos" que el depósito en sí, ya que los sedimentos se han originado por destrucción de rocas preexistentes y acumulación de los detritos derivados de ellas.

Las fechas absolutas de las edades geológicas las he dado en las tablas que al respecto anteceden, de acuerdo con las determinaciones más modernas efectuadas por muchos investigadores con distintos métodos. Aunque a veces todavía un poco inseguras, tenemos ya un cuadro general bastante satisfactorio. Las rocas más antiguas conocidas hasta ahora son las del pre-Cámbrico inferior, del Arqueozoico, de Karelia, al norte de Leningrado, con 1.850 millones de años. Pero la "edad de la tierra" debe ser mayor. Bastante mayor. Pero, ¿cuánto?

Russell, hace ya 25 años, realizó un primer cálculo sobre la posible edad de la Tierra basado, otra vez, en la radioactividad del uranio. Partió, para ello, del promedio de elementos radioactivos y de plomo que se encuentra en las rocas ígneas. Admitió que en una tonelada de roca ígnea existe, término medio, 7,5 gramos de plomo, 6 gramos de uranio y 15 gramos de torio. Estas cantidades de elementos radioactivos pueden expresarse, desde el punto de vista del plomo generado, en términos de uranio exclusivamente y entonces la cantidad de $U + 0,38 Th$ total será equivalente a 11,7 gramos de uranio. Supuso luego que todo el plomo de las rocas ígneas es radiogénico y, en ese caso, es evidente que la cantidad de uranio

original debió haber sido de 20,3 gramos. Ahora bien, el tiempo necesario para que 20,3 gramos de uranio den 7,5 gramos de plomo dejando 11,7 gramos de uranio, es apenas mayor que 3.000 millones de años. La "edad de la Tierra" no puede ser mayor que esta cifra porque remontándonos más en el pasado, tropezamos con la incongruencia de que existía uranio pero que el uranio no se desintegraba en plomo.

En realidad no hemos datado la "edad de la Tierra" sino la edad, la fecha, de la formación del uranio. Hemos datado la "edad del Universo" y, por la misma razón, no podemos ir más atrás sin caer en incongruencias. Cálculos más modernos realizados por Holmes han confirmado en lo esencial la idea de Russell y hoy se acepta la fecha de 3.000 millones de años como el límite máximo posible de la edad del Universo. Edad que está en un todo de acuerdo con los cálculos de Sir Arthur Eddington, basados en la estabilidad de las nebulosas espirales, y en los de Chandrasekhar sobre estabilidad de los sistemas binarios de estrellas.

En el uranio hallamos "los vestigios de un comienzo" que Hutton no podía encontrar "en la economía del mundo"...

TEMPANOS A LA DERIVA

Durante la primera mitad del siglo pasado, mientras geólogos y paleontólogos se afanaban en la búsqueda de los primeros datos realmente científicos, poco tiempo quedó libre para especulaciones y teorías generales. Y, en particular, nadie vió problema en la distribución de los actuales continentes y océanos que se aceptaron como "dados" y permanentes. Pero en la segunda mitad del siglo, a medida que el acopio de datos en todo el mundo aumentaba vertiginosamente, fué haciéndose cada vez más claro que los continentes, hoy separados y alejados unos de otros, debieron tener antaño conexiones estrechas.

La distribución de muchos animales y plantas, tanto en la actualidad como en diversas épocas del pasado geológico, resultaba cada vez más difícil sino imposible de explicar sin recurrir a conexiones más estrechas que las actuales. Y del concepto primario — el de la "permanencia" de los continentes y océanos —, se pasó así al de los continentes parcialmente hundidos. Se admitió que, en otras épocas, los continentes fueron mucho más extensos que hoy día y que grandes partes de los mismos desaparecieron luego bajo las aguas oceánicas, desconectando los fragmentos que permanecieron sumergidos.

Siguiendo a Suess muchos geólogos admitieron, por ejemplo, que en el período Carbonífero la mayor parte de Sud América, casi toda el Africa con Arabia y Madagascar, la India peninsular y las dos terceras partes de Australia formaban un único continente que se extendía ininterrumpidamente a

través de lo que son hoy los océanos Atlántico e Indico. Este es el famoso "continente de Gondwana" que deriva su nombre de las provincias de Gondwana en la India. Un gran "mar mediterráneo", orientado de este a oeste y cruzando por donde hoy se eleva el Himalaya, el Cáucaso, los Cárpatos y los Alpes, separaba este continente "austral" de otros igualmente inmensos situados al norte de aquel mar: el "continente nord-atlántico" que comprendía parte de los Estados Unidos, Canadá, Groenlandia y Europa y el "continente siberiano" que abarcaba casi toda el Asia. Estos dos continentes "boreales" que, en conjunto, formaban "Laurasia", estaban separados por una angosta faja marina que, con rumbo norte-sur, se extendía por donde hoy se elevan los montes Urales.

Pero bien pronto aparecieron dificultades. El hundimiento a profundidades inmensas de enormes bloques continentales allí donde hoy se explayan los océanos Atlántico e Indico, resultaba casi imposible de admitir. Los geofísicos meneaban la cabeza y decían que no. (Casi siempre han dicho que no a las hipótesis formuladas por los geólogos). El hundimiento de masas continentales inmensas era imposible desde el punto de vista geofísico y, además, en el fondo del Atlántico y del Indico había sólo una mísera y delgada capa de "rocas continentales" tapizando las rocas "oceánicas" más densas. Cosa que demostraban recurriendo al comportamiento de las ondas sísmicas producidas por grandes terremotos, al atravesar estos océanos.

Y entonces los geólogos, para salir del atolladero, encogieron las conexiones intercontinentales hasta convertirlas en puentes o istmos tendidos a través de los océanos como angostas fajas de "tierra firme". El "continente de Gondwana" se convirtió así en una especie de rosario: las cuentas eran Sud América, Africa y Australia, ensartadas por un hilo delgado que atravesaba el Atlántico y el Indico.

¿Acaso no estaba allí el ejemplo palpable del istmo de Panamá? Sabemos positivamente que, desde el punto de vista geológico, el istmo es "reciente". Hace un millón de años, sobre poco más o menos, los continentes Norte y Sudamericanos estaban completamente separados y sus faunas de grandes mamíferos eran totalmente distintas. Norteamérica estaba habi-

tada por animales "modernos" y junto a diversos roedores, tapires, ciervos, guanacos, mastodontes, caballos y chanchos salvajes, pululaban los carnívoros entre los que reinaba el tigre con dientes de sable. Sudamérica era, en cambio, la patria de una pacífica fauna de grandes herbívoros: los ungulados "australes" como los toxodontes y tipoterios y los grandes desdentados (que de desdentados sólo tienen el nombre) como los megaterios y gliptodontes. Los escasos "carnívoros" no eran tales, sino pequeños marsupiales parientes de las comadrejas. Movimientos orogénicos ocurridos hacia el final del Terciario ocasionaron el surgimiento del actual istmo de Panamá. Y el resultado fué funesto para la indefensa y pacífica fauna austral.

Por el istmo migró hacia el sur la fauna "boreal" y los grandes carnívoros dieron pronta cuenta de los gliptodontes y megaterios. El puma, el jaguar, los "lobos" y diversos zorros sudamericanos son los descendientes de aquellos invasores. De la fauna autóctona sólo quedan resabios "enanos" en los peludos, mulitas, quirquinchos, perezosos y osos hormigueros. Pero también la fauna austral utilizó el istmo como puente y hoy existen armadillos en Texas, Florida, California y México y comadrejas en los estados australes de la Unión. Los toxodontes llegaron hasta Nicaragua y allí se extinguieron definitivamente.

El ejemplo del istmo de Panamá es tan evidente y tan incontrovertible que muchos geólogos se dejaron tentar y se lanzaron a tender puentes intercontinentales por todas partes. Y hasta hubo alguno que, como Pierre Termier, sospechó que la Atlántida de Platón, elgolfada por un cataclismo tremebundo, bien pudo ser uno de estos "puentes" situado entre Europa y las Azores.

Todo el mundo ha oído hablar de "la Atlántida encantada que describió Platón", pero me atrevo a sospechar que no todos conocen la leyenda. Platón la relata en dos breves pasajes de sus obras y el más extenso se encuentra en su *Timeo* o *De la Naturaleza*. Allí Critias, conversando con Sócrates, Timeo y Hermócrates, habla de Solón y de un viaje que el legislador ateniense realizara a Egipto. Y de cómo un viejo sacerdote de la tierra de los faraones le narró el relato maravilloso. "Los libros" — dijo el sacerdote —, "nos enseñan el asalto de Atenas por un ejército singularmente poderoso, ejército venido del mar atlán-

tico y que invadió insolentemente Europa y Asia. Porque ese mar era entonces navegable y había, más allá del estrecho que vosotros llamáis Columnas de Hércules, una isla, más grande que Libia y que el Asia. De esta isla se podía pasar fácilmente a otra y de éstas a todo el continente que rodea al Mar Interior... En la Isla de Atlántida reinaban reyes de un grande y maravilloso poderío. Tenían bajo su dominación a la isla entera, a muchas otras islas y a algunas partes del continente. Y además, de este lado del estrecho, reinaban sobre Libia hasta Egipto y sobre Europa hasta el Tirreno. Toda esta pujanza se reunió un día para sojuzgar de un solo golpe a nuestro país, al vuestro y a todos los pueblos que vivían de este lado del estrecho." Y cuenta el sacerdote cómo los ejércitos "atenienses" combatieron solos contra los atlantes invasores y cómo obtuvieron victoria tras victoria, hasta que "más tarde, grandes terremotos e inundaciones tragan en un solo día y una sola noche fatales a todos los guerreros que había entre vosotros. La isla de Atlántida desapareció bajo las olas. Desde entonces el mar en esos pasajes se ha hecho impracticable para los navegantes: los navíos no pueden ya pasar a causa de las arenas que se extienden sobre el emplazamiento de la isla abismada". Y todo eso ocurría, según el sacerdote, hacia el año 9.000 antes de Cristo.

Termier, con sólida base científica y bastante imaginación, jugó con la idea de que, en efecto, una tierra tal haya existido al poniente de las Columnas de Hércules — el estrecho de Gibraltar moderno —, y haya desaparecido en tiempos no muy remotos en medio de erupciones volcánicas, terremotos e inundaciones. Otro francés, Julio Verne, con mucha menos base pero con bastante más imaginación, no titubeó en maravillar nuestra fantasía de niños haciéndonos entrever las ruinas submarinas de Atlántida iluminadas por los resplandores fantásticos de una erupción en el fondo del mar. Pero se me ocurre que si la leyenda tiene en verdad algún fundamento (y no es obligatorio que lo tenga), si existió alguna vez una raza de piratas que asoló las costas de Grecia y cuya patria desapareció bajo las aguas, deberíamos buscar la ubicación de Atlántida más cerca de la Hélade. Allí está el Santorín en pleno mar Egeo, que nos dice de una civilización pre-Micénica desaparecida

unos 2.000 años antes de Cristo a consecuencia de una erupción tan tremenda como la del Krakatoa en 1883. Explosión que "abismó" una gran isla y debió lanzar sobre la Hélade vecina una ola gigantesca, un "raz de marée" como dicen los franceses, de esas que no se olvidan así como así. Claro que por ese entonces no había "atenienses". Los dorios no habían invadido aún el Peloponeso y la misteriosa "raza mediterránea" no había levantado aún las murallas ciclópeas de Micenas.

Pero esto de tender puentes e istmos continentales para después hundirlos y hacerlos reaparecer en otras partes casi a *piacere* es demasiado subjetivo, artificioso e hipotético. Y fuerza es confesar que, esas angostas, sinuosas y largas fajas de tierra firme que muchos geólogos imaginan a través de los océanos, no son excesivamente convincentes. Y así, a comienzos del siglo, surgió una nueva teoría que causó considerable revuelo en su época y que hoy tiene fervorosos partidarios y enconados opositores. Me refiero a la "teoría del desplazamiento de los continentes". Si bien Pickering y Taylor habían emitido la idea en 1907 y 1910, pasó con ellos lo que con Lamarck y Geofroy Saint Hilaire. Pocos fueron los que los tuvieron en cuenta hasta que el libro de Wegener "El Origen de los Continentes y Océanos" publicado en 1912 vino, como "El Origen de las Especies" de Darwin, a revolver el avispero y despertar bruscamente el interés por el problema.

Alfred Wegener, que no era geólogo sino meteorólogo (Darwin no era biólogo, sino geólogo) partió de algo muy sencillo y en extremo llamativo: el notable paralelismo entre las costas atlánticas de Africa y Sud América, que ya desde el siglo XVIII había causado la extrañeza de muchos geógrafos. La similitud geográfica es tanta que si acercáramos entre sí los dos continentes, la saliente brasileña de los estados de Ceara, Río Grande do Norte y Paraíba encajaría a las mil maravillas en el golfo de Guinea del otro lado del océano. Y bien pronto aparecieron otras semejanzas geográficas, como aquella entre la costa occidental de Madagascar y la oriental del Africa.

Wegener comenzó entonces a estudiar si a esta similitud y a este paralelismo geográfico correspondía una semejanza geológica. Y el resultado fué, para él, decisivo y convincente. Y encontró, en efecto, muchos casos de notable parecido en

cuanto a la constitución geológica de las rocas opuestas de Africa y Sud América, de Europa y Norte América, de Africa y Madagascar... Y en el "continente de Gondwana" halló el mayor apoyo a su teoría. Esto nos interesa especialmente a nosotros, los que vivimos hoy en un resto de aquel viejo continente.

La historia geológica de Brasil, Uruguay, Paraguay y buena parte de Argentina es, desde fines de la Era Paleozoica hasta bien entrada la Mesozoica, extraordinariamente parecida a la historia geológica de Sud Africa, la India peninsular y Australia. En todas estas vastas regiones hallamos un conjunto de sedimentos de origen continental que encierran restos de plantas fósiles y de reptiles. Y en todas estas regiones el conjunto de los depósitos continentales comienza con potentes conglomerados acumulados por la acción del hielo. Porque una "edad de hielo" sobrevino hace unos 200 millones de años, al comenzar lo que llamamos el período Pérmico, e inmensos glaciares se extendieron por los continentes australes fusionándose en enormes casquetes como los que hoy cubren a Antártida y Groenlandia. En Sud América el hielo se extendió desde las Malvinas hasta São Paulo y quizá aún más al norte. En el Africa cubrió todo el extremo sur del continente, en la India toda la gran península del Dekkan y en Australia la casi totalidad del continente-isla. Al disiparse los hielos dejaron en todas partes enormes acumulaciones de rodados que luego se consolidaron y se convirtieron en conglomerados tenaces, que a veces alcanzan a más de 1.000 metros de espesor.

Pero no todo era hielo. Zonas marginales y picos emergían de estos inmensos mantos helados y en ellas, y hasta quizá sobre los glaciares mismos semicubiertos por rodados y tierra, prosperaba en todas estas regiones una notable y monótona flora de grandes helechos con semillas, cuyo representante más típico es *Glossopteris*, es decir "hoja con forma de lengua". Las mismas especies se conocen en todos los "fragmentos" del viejo continente de Gondwana y la malhadada expedición de Scott al polo Sur trajo restos de estas plantas hallados en el (actual) glaciar de Beardmore, a menos de 5 grados del polo en el corazón de Antártida. Cosa que, dicho sea de paso, no deja de llamar la atención pues no vemos claramente qué hacían tan

cerca del polo, donde la noche dura seis meses, plantas con clorofila que necesitan luz para subsistir.

Con la desaparición final de los glaciares, la "flora de *Glossopteris* se desarrolló con más comodidad y entusiasmo, pero con la misma pobreza y monotonía de tipos. Y a los restos de estas plantas deben los "países Gondwánicos" —Brasil, Sud Africa, Australia y en menor escala Argentina—, casi todos sus depósitos de carbón. Una curiosa fauna de reptiles aparece ahora sobre los continentes ya sin hielo y con clima cada vez más llevadero. Son reptiles notabilísimos, que se asemejan tanto por su aspecto general a los mamíferos modernos que se los ha llamado Theromorfos, reptiles "con forma de bestias" (bestias en el sentido de mamíferos...). Los hubo diminutos y grandes, desde el tamaño de un ratón hasta el de un elefante chato, petiso y rechoncho. Muchos tenían dientes diferenciados en molares, caninos e incisivos como los perros actuales. Junto a ellos persistían anfibios gigantes y aparecían cocodrilos primitivos.

Pero aquí las cosas no andan, en realidad, tan bien como debieran. Si en todos los continentes australes y la India peninsular hallamos las mismas especies de plantas fósiles, en cambio no encontramos los mismos reptiles. Parecidos, sí. Muy parecidos, también. Pero iguales, no.

Wegener, en un principio, había reconstruido la posición original de los continentes pegando Sud América al Africa pero entonces: ¿Cómo es que los reptiles sudafricanos son distintos, aunque parecidos, a los de Brasil? Y así como Darwin tuvo un Hackel, Wegener tuvo un Du Toit. Este gran geólogo sudafricano, desaparecido hace pocos años, se convirtió en el defensor, promulgador y, naturalmente, también modificador de las ideas de Wegener. Y entre las modificaciones que introdujo fué admitir que entre Sud América y Africa existió siempre una separación, relativamente pequeña pero separación al fin, que impidió la migración de los reptiles sin dificultar la dispersión de las plantas, cuyas semillas, transportadas por el viento, salvaron fácilmente el obstáculo.

Y bien. Según Wegener y Du Toit todos los continentes estuvieron al principio reunidos en una sola masa, a la cual el primero llamó "Pangea", la "unión de las tierras". Claro que

hay algunas variantes en cuanto a cómo agrupar las tierras y dónde encajar, unos en otros, los continentes actuales. Para Wegener, por ejemplo, el Africa y Sud América estuvieron en contacto directo y la Antártida estuvo un día ubicada al sur de Africa, entre Australia y América. Para Du Toit, en cambio, existió una lonja de tierra — quizá de unos 800 kilómetros de ancho —, interpuesta entre Africa y Sud América (que hoy estaría representada por la famosa "dorsal" que corre por la línea media del Atlántico y sobre la cual se instalan las islas de Tristán da Cunha, Ascencio, Trinidad). La Antártida estuvo aún más "al norte", encastrada entre Africa y Australia, al sur de la India. Pero estas variantes no alteran mayormente la idea central de la Pangea.

La teoría no explica cómo se formó y por qué, esta Pangea. Se contenta con aceptarla como "dada" y aunque podemos imaginar dos o tres hipótesis distintas para explicar su origen, estas hipótesis no son esenciales para la teoría. Parte, pues, de la premisa de que en un principio todos los bloques continentales estaban agrupados en una masa única rodeada por el océano. Esta "unión de las tierras" perduró hasta bien entrada la Era Mesozoica (según Wegener). Y luego se partió en bloques inmensos, de tamaño realmente continental, y empezó la deriva. Como témpanos flotando en el mar, así los bloques, flotando en un substrato más denso, comenzaron a separarse unos de otros. Y el movimiento aparente fué tal como si Africa hubiera permanecido fija e inmóvil. No es que los bloques huyeran del continente negro como de la peste sino que en este, como en todo "movimiento relativo", es necesario elegir arbitrariamente un punto como fijo para referir a él todos los desplazamientos observados.

Según Wegener el movimiento fué rápido. Y, a veces, muy rápido. Supuso que Groenlandia había estado soldada al norte de Europa aún en el Cuaternario antiguo y que su deriva hacia el oeste era cosa tan reciente que debía perdurar en la actualidad. Y aquí surgía una posibilidad de comprobar la teoría. Sólo era cuestión de determinar con exactitud la longitud geográfica de un punto en Groenlandia y repetir la observación al cabo de algunos años para comprobar si había ocurrido algún cambio.

En 1823 Sabine había determinado la longitud geográfica de la Isla Sabine en Groenlandia oriental y la determinación había sido repetida en 1870 por Börger y Copeland y luego en 1907 por Koch. Y parecía que, en efecto, había ocurrido un desplazamiento total de unos 1.610 metros hacia el oeste durante el período de 84 años que va desde 1823 a 1907. Pero el asunto no era nada claro. En primer lugar era probable que las determinaciones de Börger y Copeland no hubieran sido realizadas en el mismo y exacto punto de Sabine. En segundo lugar Koch hizo sus determinaciones en Danmarkshafen, al norte de la Isla Sabine, punto de observación que más tarde fué conectado con el de Börger y Copeland por medio de triangulación geodésica. En tercer lugar las determinaciones del siglo pasado fueron hechas en base de observaciones de la posición aparente de la luna con respecto a las estrellas, método que no es suficientemente exacto en sus resultados.

En el oeste de Groenlandia también se habían realizado similares determinaciones. Falbe y Bluhme habían fijado, en 1863, la longitud geográfica de Orornoq en el fiordo de Godthaab y von Ryder había repetido la determinación en 1882-1883. Pero en este caso, siempre con mediciones en base de posiciones lunares, parecía que se registraba un movimiento inverso, hacia el este, con una disminución en la longitud geográfica de 2,6 segundos. Pero en 1922 Jensen repitió las determinaciones con exactitud, utilizando señales inalámbricas desde Nauen y pasajes de estrellas y obtuvo un valor casi 5 segundos mayor que el promedio de las observaciones anteriores, lo que representaba una deriva hacia el oeste de unos 980 metros. Sólo cinco años más tarde, en 1927, el mismo punto de Jensen fué utilizado por Sabel-Jørgensen para nuevas y exactas mediciones y, aun abandonando los resultados anteriores a 1922, obtuvieron una diferencia de longitud con la hallada por Jensen que parecía sobrepasar, y con mucho, a todo posible error instrumental y que representaba una deriva hacia el oeste de unos 36 metros por año.

En 1932 Jelstrup volvió a determinar la longitud de la Isla Sabine reocupando la estación de Börger y Copeland y, efectuando mediciones precisas con métodos modernos y abandonando los resultados inciertos de 1823, halló que para el período

1870-1932 se registraba una deriva hacia el oeste de más de 615 metros, es decir, alrededor de 10 metros por año. Por último, las determinaciones efectuadas en 1882-1883 por von Basso en la Isla de Jan Mayen, fueron repetidas por Tollner-Kopf en 1932-1933 y, otra vez, el resultado fué hallar un desplazamiento hacia el oeste equivalente a unos 25 metros por año, casi 10 veces más que los errores instrumentales probables en ambos grupos de observaciones. Notablemente, en ninguna de las mediciones se comprobó cambios apreciables en la latitud geográfica.

Estos resultados alentaron a Du Toit para afirmar, en 1937, que pocas dudas podían caber acerca de la real, efectiva y rápida deriva de Groenlandia hacia el oeste. Pero lamentablemente en ese mismo año de 1937 Norland demostró que las determinaciones de longitud realizadas en Groenlandia son muy poco dignas de confianza. En 1936 en Instituto Geodésico de Dinamarca volvió a realizar observaciones en Orornoq (o Kornok) en el mismo punto utilizado por Sabel-Jørgensen en 1927, empleando un teodolito geodésico de alta precisión. Las dos medidas, de 1927 y de 1936, dieron prácticamente el mismo resultado y Norland concluyó que "las desviaciones de las observaciones viejas con respecto a las nuevas se deben, con toda probabilidad, a errores de observación". "¡Buen!", — dijo Chester Longwell comentando el trabajo de Norland y frotándose las manos —, "Groenlandia no se mueve". (Y debe haberse sonreído con satisfacción, porque la teoría de Wegener no le gusta). Pero no conviene precipitarse. También Stoyko, luego de un minucioso análisis de los datos del Servicio Internacional de la Hora a partir de 1920 concluyó que no existen (o que no existen *más*) desplazamientos continentales que alcancen valores como los previstos por Wegener para Groenlandia. Y, sin embargo, comparando las longitudes geográficas de 1926 y 1933 de 17 estaciones de Europa, Asia y Africa con 7 estaciones de América del Norte, Mme. Dubois y Stoyko concluyeron que los errores en las determinaciones "son superiores a los posibles desplazamientos y no excluyen que estos puedan acercarse realmente a los valores previstos por Wegener". Como dijera Coulomb hace muy poco, las desviaciones entre las longitudes de 1926 y las de 1933 "corresponden a un

error medio del orden de 0,025 segundos, que bien podría ser atribuido a la incertidumbre de nuestros conocimientos acerca de la propagación ionosférica", es decir, a posibles fluctuaciones en la propagación de las ondas de radio y, por lo tanto, a "errores de hora". En resumidas cuentas, que no sabemos si Groenlandia se mueve o no se mueve.

Pero este asunto de la movilidad de Groenlandia no es tan importante para la teoría como parece. Si finalmente se alcanzara a demostrar que Groenlandia no se mueve, no por eso se demostraría la falacia de la teoría del desplazamiento continental. Lo único que se demostraría es que Groenlandia no se mueve... en la actualidad, o que lo hace tan lentamente que su deriva hacia el oeste no es mensurable con el instrumental moderno y los métodos más refinados.

Todo esto es muy bonito. Pero falta explicar porqué y cómo se produjo el desplazamiento o deriva de los bloques continentales. Y cuál la fuerza motriz controladora de tales movimientos.

Wegener dió, como es de imaginar, una explicación. Pero los geofísicos dijeron otra vez no. Y justo es confesar que, esta vez, con bastante razón. Wegener recurrió a la simple fuerza centrífuga y arguyó que, siendo el diámetro ecuatorial de la Tierra mayor que el polar, los continentes despedazados tenderían a migrar de los polos hacia el ecuador, a "huir de los polos". Y a esto llamó "Polflucht", "huída de los polos". Como causa secundaria recurrió a la rotación de la Tierra y vió allí una fuerza que tendería a desplazar los continentes hacia el oeste. La explicación de Wegener podría servir cualitativamente, pero cálculos modernos han demostrado que, cuantitativamente, no funciona pues estas fuerzas no son, ni con mucho, suficientes como para provocar el desplazamiento de los inmensos bloques continentales. Jeffreys, haciendo como acostumbra alarde de matemáticas, demostró que en las latitudes medias esta fuerza centrífuga del "Polflucht" tendría un valor de sólo cinco gramos por centímetro cuadrado y sería, pues, absolutamente inadecuada para mover continentes.

Si los continentes no se mueven por ellos mismos, bien podría ser, en cambio, que se movieran porque son llevados. Algo así como lo que me sucede cuando doy un paseo en automóvil.

No es que yo me mueva porque tengo oculto un motor bajo la chaqueta, sino porque soy llevado pasivamente por el automóvil que se mueve. Bueno, pero ¿dónde está el automóvil que lleva pasivamente los bloques continentales y qué es lo que lo hace mover? La cosa no es tan difícil como parece. El automóvil son las "corrientes del substrato" y el motor del automóvil, la fuerza motriz de las corrientes, podría ser el calor interno de la Tierra. Claro que volvemos otra vez a las corrientes convectivas, pero qué le vamos a hacer.

Así, por ejemplo, el desplazamiento de Sud América de este a oeste sería debido a una corriente del substrato dirigida desde el Atlántico hacia el Pacífico que transportaría, como cinta sin fin, al bloque continental cómodamente instalado en su lomo. Esta corriente tendría un frente de unos 4.500 kilómetros de ancho (en la actualidad) y luego de desplazarse paralelamente a la superficie terrestre, torcería hacia abajo, hundiéndose verticalmente en el borde pacífico del continente. Una corriente tal explicaría no sólo la deriva de Sud América hacia el oeste sino la razón de los tipos distintos de sus costas opuestas — de fracturación y tracción en el Atlántico y de compresión y plegamiento en el Pacífico —, y la existencia de geosinclinales en el borde occidental, incluyendo a la fosa de Atacama que no es más que un geosinclinal en fase de hundimiento preorogénico.

Hay algo que ocurre en lo profundo, muy por debajo del bloque continental y muy por debajo de la "discontinuidad de Mohorovičić", que hace sospechar que estas corrientes existen realmente y están aún en pleno funcionamiento. Me refiero a los terremotos profundos, a los "sismos plutónicos" como se los designa a veces, cuyos focos se encuentran entre 70 y 700 kilómetros de profundidad.

Las distribución de estos terremotos es curiosísima. Con excepción de unos pocos en Rumania, 30 en el Himalaya al norte de la India y cuatro o cinco en Birmania, todos han ocurrido (y siguen ocurriendo) en la zona circumpacífica de América, Asia, Malasia y Polinesia.

Los del continente Sud Americano se distribuyen desde el centro de Chile y Argentina hasta el centro de México, desparrramados en una faja de unos 500 a 700 kilómetros de ancho. Pero, notablemente, la profundidad de sus focos aumenta a medida

que ocurren más al este, más "tierra adentro", más alejados de la costa pacífica. Así, por ejemplo, en la costa de Chile estos terremotos tienen focos entre 70 y 250 kilómetros de profundidad, en la región andina de Bolivia y del norte de Argentina los tienen entre 250 y 500 y más al este aún, en el pie oriental de las Sierras de Córdoba, en la llanura chaqueña y en el "oriente" peruano, por debajo de los 500 kilómetros. Por otra parte es evidente que no ocurren en cualquier profundidad sino que tienen decidida predilección por ciertos niveles. Analizando una tabla de sismos profundos, como la publicada por Gutenberg y Richter en 1949 donde se dan todos los registrados en Sud América desde 1906, surge en seguida que la mayoría ocurre en los niveles de 70-80 kilómetros de profundidad, 100 a 120, 150, 200, 250, 580 a 600 y 650. Benioff, en 1947, sacó de este hecho la conclusión un tanto fantástica y alarmante de que una tremenda falla, de 4.500 kilómetros de largo y 900 de ancho, corre por todo el borde pacífico de Sud América inclinándose por debajo del continente con ángulo de casi 45 grados hasta los 650 kilómetros de profundidad. Se me ocurre otra posibilidad, quizá igualmente fantástica, pero probablemente menos alarmante.

Supongamos que una corriente de substrato de unos 4.500 kilómetros de frente, que afecta los materiales del interior de la tierra hasta una profundidad de 700 kilómetros, se desplace paralelamente a la superficie terrestre por un trecho de 3.000 ó 4.000 kilómetros para luego doblar hacia abajo haciéndose subvertical. ¿Qué sucederá? Pues que la parte superior de la corriente, la más cercana a la superficie de la Tierra, se desplazará, en la zona donde la corriente tuerce hacia abajo, con mayor velocidad lineal que la parte profunda pero, como los materiales están en estado plástico, la velocidad angular, será algo menor en la zona superficial que en la profunda. Y es probable que este "retraso" en las velocidades lineales, ayudado quizá por transiciones polimórficas al penetrar los materiales en mayores profundidades, produzca una especie de estratificación de velocidades en capas concéntricas sucesivas. Bien podría ser, pues, que los sismos profundos, con su estratificación en ciertos niveles preferidos, señalen contactos entre capas sucesivas de distintas velocidades, decrecientes en general de la parte exterior

a la interior. Y, en verdad, estudiando la distribución de los focos de los sismos sudamericanos, parecería que existieran varias de estas superficies subparalelas, inclinadas hacia el oeste con ángulo de unos 30 grados entre profundidades de 80 y 200 kilómetros, tendiendo a hacerse subverticales en niveles más bajos.

XIV

LA ANTARTIDA EN EL CONGO

La Tierra, tal como se nos presenta hoy día, no está en sus condiciones normales. Tiene hielo. Bastante hielo. Y hoy nos resulta claro que esta característica no es lo normal ya que, computando la totalidad del tiempo en que nuestro planeta estuvo libre de hielos y el tiempo en que en alguna parte hubo glaciares, es mucho más largo el primero que el segundo. El clima normal de la Tierra es "akryógeno", lo que equivale a decir, en difícil, "sin hielo", en vez de "kryógeno" como el actual.

El solo enunciado de que la Tierra pasó por épocas sin hielo y por "edades de hielo" plantea de inmediato un problema bastante difícil. ¿Por qué sobrevienen de cuando en cuando esas "edades de hielo"? ¿Por qué de pronto aparece hielo y los glaciares se extienden, se fusionan y llegan a formar inmensas masas como la que hoy cubre Antártida o Groenlandia? Y en seguida otro problema. ¿Cómo, en épocas pasadas, pudieron existir enormes masas de hielo en Australia, Sud Africa, la India, Brasil y Argentina, en regiones situadas, muchas de ellas en los trópicos o directamente en el ecuador? ¿Y cómo un contracua-dro similar no se encuentra en Asia, Europa y Norte América que, cuando los continentes australes estaban englaciados, no tenían hielo?

Henos sumergidos de lleno en el difícil, complejo y escabroso problema de los climas del pasado. Pero vayamos por partes. Está muy bien eso de afirmar que, en otras épocas, grandes extensiones de la Tierra estuvieron cubiertas de hielo. Pero; ¿es cierto? ¿Podemos probarlo?

Desde hace mucho tiempo, mucho antes de que hubiera geólogos y geología, los montañeses suizos habían llegado a la conclusión de que los glaciares que hoy descienden de los altos macizos alpinos habían sido "antes" mucho más extensos y habían alcanzado zonas más bajas de los valles. Porque allí estaban patentes las huellas del hielo, rocas pulidas, cepilladas y estriadas, enormes "bloques erráticos" desparramados al azar, acumulaciones de escombros en forma de media luna cruzando los profundos valles. Y no había más que observar durante algunos años un glaciar actual para saber quién había sido el culpable de todo aquello.

Fué, naturalmente, en Suiza, donde esta noción popular se hizo concepto científico. Venetz, ingeniero de Lucerna, fué el primero en afirmar, allá por el año 1821, que los glaciares alpinos fueron un día mucho más extensos que en la actualidad. Y poco después, Jean de Charpentier, suizo también, abrazaba con entusiasmo la idea. Pero Juan Louis Agassiz, joven zoólogo amigo de Charpentier, torció el gesto y para convencerle del disparate que estaba diciendo le invitó a dar un paseo por los glaciares famosos de los Diablerets. La excursión, emprendida en 1836, fué memorable porque, naturalmente, fué Agassiz quien quedó convencido. Pronto empezó a bullirle en la cabeza una idea que expresó verbalmente en 1837 y publicó en 1840. La idea de una gran "edad de hielo" por la que había pasado la Tierra, imaginando un vasto manto helado extendiéndose desde el Polo Norte hasta los Alpes y el centro de Asia. Charpentier, que completaba un libro publicado finalmente en 1841, se molestó un poco por lo que consideró falta de delicadeza de Agassiz al intentar quitarle la primicia, pero a todo hay quien gane. Porque ya en 1832 Bernhardt, profesor en la Academia de Dresdingacker, había llegado a la conclusión de que, en tiempos pasados, el hielo se había extendido desde las regiones polares hasta el centro de Alemania. Y, naturalmente, nadie le había tomado en serio.

Las ideas de Venetz, Charpentier y Agassiz tardaron bastante en ser aceptadas universalmente. En Inglaterra, el gran Lyell había explicado el origen de los grandes bloques erráticos que se encuentran desparramados en muchas regiones, suponiendo que en épocas no muy remotas las Islas Británicas habían

estado enteramente sumergidas y que los bloques en cuestión habían sido transportados por témpanos y hielos flotantes que allí se habían derretido dejando caer su carga. Por eso el nombre de "drift" ("flotar a la deriva") que dió a tales bloques nombre que, pese a lo erráneo del concepto, perdura hasta nuestros días en los países de habla inglesa. Sólo con la visita de Agassiz a Inglaterra comenzaron a modificarse las cosas y sus ideas a encontrar eco aunque Lyell, fiel a su "Uniformitarismo", sólo alcanzó a aceptar que el "drift" de Escocia era realmente depósito de glaciares continentales. Allí habían montañas y era fácil admitir que los glaciares habían sido antes más grandes, pero que se hubieran extendido por Inglaterra como manto de hielo era otra cosa. Si Lyell hubiera conocido Antártida no habría encontrado dificultad en aceptar totalmente la idea de Agassiz sin violentar su amado "Uniformitarismo"...

El zoólogo suizo, ya famoso, pasó en 1846 a ser profesor en la Universidad de Harvard y pronto sus ideas se extendieron en Norte América, especialmente luego de un entusiasta trabajo de Dana donde las encomiaba sin cortapisas.

Hoy ya nadie duda de que el hielo puede formar masas inmensas cubriendo continentes. Porque allí está Groenlandia y, sobre todo, Antártida, verdadero continente comparable a Australia íntegramente cubierto por un espeso manto helado. Y estudiando en detalle los glaciares actuales, la erosión que producen, los depósitos que acumulan, no pueden caber dudas de que, tal como Agassiz sostuviera, grandes partes de Europa, Canadá y Siberia estuvieron realmente cubiertas por masas de hielo comparables a las de la Antártida actual.

Pero esta "edad de hielo" que comenzó hace un millón de años y cuyas postrimerías estamos presenciando hoy, no fué la única que soportó la Tierra en tiempos pasados. Cuando los geólogos aprendieron a reconocer el "origen glacial" de ciertos conglomerados por sus características distintivas, se dieron cuenta de que, en algunas regiones de la Tierra, existían grandes masas de tales sedimentos acumulados en tiempos muchísimo más remotos que el de la última gran glaciación que cubriera Europa y Canadá. La última edad de hielo comenzó, como dije, hará cosa de un millón de años y con varios máximos de gran expansión y varios períodos interglaciales, continúa hasta nuestros

días. Pero hace unos 230 millones de años, durante el Pérmico Inferior, otra "edad de hielo" tanto o más intensa, afectó a la Tierra dejando huellas profundas e innegables en enormes extensiones de Australia, la India peninsular, Sud Africa, Brasil, Uruguay, Paraguay y Argentina. Y antes aún, hará cosa de 500 millones de años, durante el período Cámbrico y aún antes, entre 700 y 800 millones de años atrás, en pleno pre-Cámbrico, grandes partes de la Tierra se cubrieron de hielo como en el Pérmico y como en la última gran glaciación del Cuaternario. Casi parecería que estas edades de hielo son periódicas, cíclicas, y ocurren cada 250 millones de años: 750, 500, 250, hoy. Tendremos que esperar otros 250 millones de años para saber si es cierto...

Pero ¿por qué la Tierra, tibia y calentita durante 250 millones de años, comienza a enfriarse hasta que sobreviene una de estas "glaciaciones"? ¿Y por qué después vuelve a su temperatura normal y el hielo desaparece? Creo no equivocarme demasiado al asegurar que alrededor de una docena de hipótesis se han formulado para explicar las fluctuaciones climáticas que originan una "edad de hielo". Y ninguna es completamente satisfactoria. Claro es que varias tienen hoy escasos visos de verosimilitud y pocos o ningún adherente, pero nos quedan unas cuantas de valor subigual, entre las que podemos elegir a *piacere* de acuerdo con nuestra experiencia personal y gustos propios. Las hay *topográficas*, que explican las edades de hielo por cambios en las alturas de los continentes y montañas. Las hay *atmosféricas*, basadas en la cantidad variable de polvo volcánico y de anhídrido carbónico contenidos en la envoltura gaseosa de la Tierra. Las hay *oceánicas*, que achacan los cambios a variaciones en la salinidad del mar y a variaciones en la intensidad y dirección de las corrientes marinas. Las hay *geofísicas*, basadas ya en el calor interno de la Tierra, ya en variaciones en la posición relativa de los continentes o en cambios del eje de rotación de la Tierra. Las hay *planetarias*, basadas en cambios periódicos de los movimientos de la Tierra como planeta. Las hay *solares*, que explican los cambios por la variación de la llamada "constante de energía solar" que recibe la Tierra. Y las hay *cósmicas*, que las achacan al pasaje de todo el sistema solar a través de nebulosas difusas de la Vía Láctea. Las hay, como tapices en

bazar oriental, de todos los colores y para todos los gustos. Y, naturalmente, nada nos impide combinar dos o tres eligiendo aquellas partes de cada una que nos resultan más verosímiles, más de acuerdo con nuestras ideas y prejuicios o, simplemente, más simpáticas.

Entre los "glaciólogos" (subespecie del género "geólogo" que se dedica a estudiar glaciares) están hoy en boga dos de estas hipótesis, elaboradas ante todo para explicar la última gran glaciación y sus peculiarísimas fluctuaciones, con períodos interglaciales durante los cuales el hielo disminuyó en gran medida. Una fué elaborada por Croll en 1875 y modernamente modificada por Milankovich. La otra fué expuesta en 1934 por Sir George Simpson. Pero, a decir verdad, pese a lo ingenioso y complicado de ambas, ninguna es excesivamente satisfactoria. La hipótesis de Croll pertenece al grupo de las *planetarias*, la de Simpson al de las *solares*. La primera se basa en cambios de la distribución de la energía solar sobre la Tierra y la segunda en las variaciones de la cantidad de esta energía que, en la actualidad, sabemos que no es constante.

La Tierra, a más, de los movimientos de rotación sobre sí misma y de traslación alrededor del sol, padece de otros varios. Según la hipótesis de Croll, tres de estos movimientos planetarios interfieren con la *distribución* de la energía solar que la Tierra recibe, aunque no con la cantidad total de esa energía. Estos movimientos son: el desplazamiento periódico del perihelio con un "período precesional" de 21.000 años, la variación regular de la excentricidad de la órbita terrestre, con un período de unos 91.800 años y la variación regular del ángulo entre el eje de la Tierra y el plano de la órbita, con un período de unos 40.000 años.

El "período precesional" originaría un cambio en la distribución de la energía solar que se puede traducir así: Durante una mitad de este período un lugar de la Tierra situado en latitudes altas del hemisferio norte, por ejemplo, tendrá inviernos comparativamente largos y fríos y veranos cortos y calurosos. Durante la siguiente mitad los inviernos serán algo más cortos que antes y menos fríos, mientras que los veranos serán más largos y algo menos calurosos. La acumulación de nieve y el crecimiento de los glaciares será facilitado, según la teoría, du-

rante el período de largos inviernos y veranos cortos, pese a la mayor temperatura registrada en estos últimos. Los otros dos movimientos planetarios contribuirán a variaciones similares pero como los períodos no coinciden, habrá máximas y mínimas de temperatura espaciadas irregularmente, que representan períodos de retroceso y de avance de los hielos.

Esta hipótesis, bastante aceptada en Europa, nunca tuvo muchos partidarios en Norte América y, en realidad, es insostenible por varias razones. Entre ellas que las glaciaciones y períodos interglaciales en el hemisferio norte deberían ser alternantes con los del hemisferio sur, cosa que está muy lejos de probarse. Por otra parte, la hipótesis no explica el *origen* de las edades de hielo, muy espaciadas, por las cuales ha pasado la Tierra y sólo serviría, a lo sumo, a explicar cualitativamente las fluctuaciones de la última gran glaciación *una vez iniciada*.

La teoría de Simpson, eminentemente deductiva, parte del hecho hoy comprobado de que la llamada "constante de energía solar" no es constante. La *cantidad* de energía solar que la Tierra recibe del sol es, aproximadamente, de 1,94 calorías por minuto y centímetro cuadrado de superficie, pero las observaciones del Instituto Smithsonian en sus observatorios de Rhodesia y del desierto de Atacama en el norte de Chile, han demostrado que esta "constante" varía en proporciones que llegan hasta el 3 por ciento de su valor medio.

Supongamos que la "constante solar" aumente — dice Simpson —. El aumento de la radiación solar produce un aumento de temperatura en la Tierra, mayor en el ecuador que en los polos. La actividad atmosférica aumenta. Los vientos más fuertes y el mayor calor aumentan la evaporación y esto trae aparejado un aumento de la nubosidad y de las precipitaciones. En el ecuador llueve, pero en las latitudes altas, nieva. Y las nevadas aumentan con el aumento de las precipitaciones, se acumula la nieve, se forman glaciares y alcanzamos un "máximo de glaciación". Pero si la temperatura sigue aumentando la nieve se licúa más rápidamente de lo que se acumula, los glaciares disminuyen por falta de alimentación y finalmente sobreviene un "período interglacial" *húmedo y caluroso*. Y ahora empiezan las cosas a marchar al revés. La radiación solar, habiendo alcanzado un máximo, comienza a disminuir y al hacerlo baja la temperatura,

decrecen las precipitaciones, vuelve a nevar y otra vez la nieve se acumula y aparece un nuevo período glacial. Y al seguir bajando la temperatura las precipitaciones disminuyen tanto que ya no nieva más, los glaciares se achican y finalmente desaparecen dando paso a un nuevo "período interglacial", pero ahora *frío* y *seco*. Simpson, pues, explica los cuatro períodos glaciales y los tres interglaciales que, por lo común, se admiten en Europa, como producidos por dos ciclos de variación en la "constante de radiación solar".

La idea es ingeniosísima pero no parece que concuerde del todo con los hechos observados. ¿O es que los hechos observados no concuerdan del todo con la teoría? Porque, en materia de la última edad de hielo, hay muchas cosas que conocemos bien, otras no tan bien y otras requetemal. Por ejemplo, no sabemos a ciencia cierta cuántos períodos glaciales y cuántos interglaciales hubo en Sud América y si coincidieron o alternaron con los del hemisferio norte. Está bien que algunos entusiastas, como Auer, hayan creído poder demostrar la correspondencia entre las glaciaciones de Patagonia y de Finlandia, pero todavía falta que nos convenzan del todo.

Más moderna (pero no más nueva) que la de Simpson es la hipótesis de Foster Flint, publicada en 1947. Flint es de los que prefieren combinar dos hipótesis en una sola y llama a la suya "solar-topográfica", porque recurre a las variaciones de la constante solar por una parte y a las variaciones en la altura sobre el nivel del mar de continentes y montañas. Lógicamente que, en la punta de una alta montaña, hace más frío que al nivel del mar. Eso ya lo dijo Dana hace más de un siglo. Y antes que Dana lo sintió personalmente en carne propia cualquiera que escaló un cerro más o menos alto.

Foster Flint supone que sólo en aquellas épocas geológicas en que se elevaron grandes cordilleras pudo sobrevenir una "edad de hielo". Pero la elevación de las montañas no es todo —mejor dicho, no es suficiente. Para que venga la edad de hielo es necesario que baje la temperatura media de la superficie de la Tierra al reducirse la cantidad de energía radiante emitida por el sol.

La hipótesis tiene la desventaja de necesitar la coincidencia fortuita de dos fenómenos distintos, no directamente relaciona-

dos entre sí: elevación de las montañas y emisión de energía solar. Y la ciencia tiene especial aversión por "coincidencias fortuitas" de este tipo. O de cualquier otro. Por otra parte sabemos que ha habido muchas edades de hielo, muchos períodos "kryógenos" durante los cuales glaciares aparecieron en la Tierra, a más de los "cuatro grandes" de Precámbrico Superior, Cámbrico Inferior, Pérmico Inferior y Cuaternario. En Argentina, no más, hay evidencia positivísima de que hubo glaciares en dos épocas distintas del Ordovícico, luego en el Devónico Inferior, en el Carbonífero Inferior y en el Superior antes de la gran glaciación del Pérmico. En el Devónico inferior los glaciares se extendían también por Brasil, desde la cuenca del Amazonas hasta la del Paraná, y alcanzaron considerable desarrollo en Sud Africa y las Malvinas. En el Carbonífero Inferior no sólo la Argentina occidental tuvo hielos, sino también Australia.

No en todos estos casos puede relacionarse la aparición de glaciares con la elevación de montañas. Esto es especialmente cierto para el caso de los glaciares ordovícicos del norte argentino y de Bolivia, pues sabemos hoy positivamente que ni en el Cámbrico ni en el Ordovícico mismo hubo aquí movimientos orogénicos que engendraron montañas importantes. Y menos aún hubo montañas dignas de tal nombre en Brasil o en Sud Africa durante el Devónico Inferior. Es posible que, en efecto, las grandes edades de hielo se deban a una coincidencia fortuita como la imaginada por Flint pero también es perfectamente posible que, sin necesidad de montañas nuevas pre-fabricadas, una reducción en la constante solar dé como consecuencia la aparición de hielos en los lugares más propicios para ello en latitudes altas.

Pero estas hipótesis especiales, elaboradas ante todo para explicar la gran edad de hielo del Cuaternario, no tienen que vérselas con otro problema importante, el de la aberrante distribución de los glaciares de acuerdo con las latitudes actuales. Hoy, y durante el Cuaternario, el hielo está donde debe estar, en los polos mismos o en sus alrededores. Pero en otras épocas la cosa ha sido muy distinta. La gran glaciación del Pérmico, por ejemplo, cubrió de hielos a casi toda Australia, la India, Sud Africa, parte del Brasil, Paraguay, Uruguay, Bolivia y Ar-

gentina hasta las Malvinas. Y hay buenos indicios de que también Antártida estuvo cubierta por hielos, tal como ahora.

Aquí hay una doble dificultad. Primero, explicar cómo el hielo se extendió desde el polo sur, hasta más allá del ecuador, porque la península de la India, aunque en pleno trópico, está enteramente en el hemisferio norte. Y segundo, explicar porqué esta fantástica glaciación afectó sólo al hemisferio austral (y la India), ya que no hay indicios de la misma ni en Asia ni en Europa ni en Norte América. Y, en verdad que la cosa no es nada fácil.

La explicación más natural parece la de admitir que, en aquella época, existía una distinta distribución de los continentes. Y eso y admitir la teoría del desplazamiento continental es casi una y misma cosa.

Los geólogos "boreales" y entre ellos Flint, pueden darse el lujo de desechar con algunas frases altisonantes y condenatorias la teoría de Wegener, pero los que nos hemos divertido machacando rocas al sur del ecuador, tenemos un poco más de cautela y bastante más respeto por la teoría. Es muy posible que yo, personalmente, esté demasiado influído al respecto por largas discusiones epistolares con Du Troit, que duraron más de 20 años, y por haber perdido algún tiempo estudiando una de las regiones que más sirvieron a Wegener para afianzar su idea: las Sierras australes de Buenos Aires. Pero aun así, con prejuicios y todo, ereo que en el momento actual es la única que nos puede sacar del atolladero.

Wegener mismo utilizó ampliamente su teoría para explicar aquella doble dificultad. Y la explicación tiene, al menos, el mérito de aclarar ambas al mismo tiempo y de modo sencillísimo. Si todos los continentes se hallaban aún reunidos en una "Pangea" durante el Pérmico Inferior, con ubicar el polo sur donde está hoy Sud Africa queda todo explicado. Primero, porque entonces la India peninsular y Brasil quedan bien dentro del "hemisferio austral" de la época. Y segundo, porque el polo norte viene a caer en pleno Océano Pacífico mientras Norte América, Europa y Asia quedan en la zona subtropical entre ambos polos. Lógico que no tengan "hielos pérmicos". Y conste que, al iniciarse el Pérmico, intensos movimientos tectónicos habían elevado, tanto en Europa como en Norte América, gran-

des cordilleras (los Appalaches entre ellas), mucho más importantes que las montañas del hemisferio austral. Y, de estar con Flint y su teoría "solar-topográfica", estas cordilleras boreales debieron estar mucho más englaciadas que los continentes australes...

Claro que no se trata de un cambio en la posición del eje de rotación de la Tierra. Nada de eso. El eje siguió inmutable, donde estuvo siempre y donde seguirá estando mientras alguna fuerza extra-terrestre no altere el movimiento de nuestro giróscopo. Los que se movieron fueron, otra vez, los continentes, los costrones de "sial", ya sea activamente o ya, lo que es más probable, llevados en el lomo de corrientes del substrato plástico. Ya sabemos que los geofísicos dicen que no, que tal desplazamiento es imposible. Pero también Lord Kelvin dijo que no cuando los geólogos dijeron que 40 millones de años era muy poca cosa para la vida de la Tierra, y Lyell dijo que no cuando Agassiz explicó su "drift". Y Suess dijo que no cuando los geólogos norteamericanos vitoreaban a Dutton y a la Isostasía. Si el desplazamiento continental es imposible, peor para los geofísicos. Para los geólogos es perfectamente posible. Y para nosotros, los geólogos "australes" más que posible, es casi necesario. No es cosa de dejarse arredrar por una imposibilidad más o menos.

La teoría del desplazamiento continental no interesa para explicar el origen, la aparición de las edades de hielo, sino para explicar la distribución peculiarísima de los hielos en el remoto pasado. Y "desplazamiento de los polos" no significa desplazamiento del eje de rotación terrestre. Cuando dos cosas cambian sus posiciones relativas hay cinco posibilidades de movimientos. A se movió y B quedó fija. B se movió y A quedó inmóvil. A y B se movieron, A más que B. O se movieron en la dirección opuesta y B más que A. O A y B se movieron en sentidos opuestos. Cuando hablamos de "desplazamiento de los polos" nos referimos al desplazamiento aparente con respecto no a los polos actuales sino a la distribución de los continentes. Y de las cinco posibilidades prefiero elegir la primera: A se movió y B quedó inmóvil. Los continentes se movieron y los polos, es decir los extremos del eje de rotación de la Tierra, quedaron inmóviles donde estuvieron siempre.

Wegener, como he dicho, explicó la ausencia de hielos en los continentes del (actual) hemisferio norte porque con su arreglo quedaban en las zonas subtropicales de entonces. En el Pérmico, como ahora, la "zonación climática" era neta, desde un extremo frígido en las altas latitudes a uno tropical en la faja ecuatorial. Pero ¿qué pasaría si el hielo desapareciera totalmente? ¿Cómo fué el clima, o los climas, en aquellas épocas "akryogenas", sin hielos, por las que pasó la Tierra?

No sé cómo habrá sido, pero creo poder afirmar sin excesivo temor de equivocarme de medio a medio que, el clima debe haber sido bastante uniforme en toda la Tierra. Al desaparecer las grandes calotas de hielo en las regiones polares y subpolares, tanto los vientos como las corrientes marinas han de haber disminuído enormemente en intensidad y poco a poco la temperatura superficial y, por ende, el clima del planeta se habrá ido emparejando. Quizá, cuando aprendamos algo más sobre los climas del remoto pasado, la hipótesis de Simpson pueda aplicarse no para explicar las fluctuaciones de la última edad de hielo sino para los grandes ciclos climáticos terrestres, considerando los larguísimos períodos que median entre las cuatro grandes glaciaciones del Precámbrico, Cámbrico, Pérmico y Cuaternario como "períodos interglaciares". Dentro de los cuales, fluctuaciones menores, dieron origen a ciclos climáticos de segundo orden con pasajeros episodios "kryogenos".

Pero nos falta mucho para dilucidar con certeza los climas del pasado. Sólo estamos bien seguros de los climas glaciales, porque sólo el hielo pudo depositar ciertos sedimentos. Pero en materia de clima "akryogenos", desde templados a tórridos, secos a húmedos, la cosa es mucho más difícil.

Las plantas fósiles, por ejemplo, nos dicen bien poca cosa en materia de climas. Sir Charles Seward, uno de los más destacados especialistas en plantas fósiles de todos los tiempos, escribió allá por 1885 su tesis doctoral que versó sobre "Las plantas fósiles como indicadores de climas". En 1936, en oportunidad del Congreso Paleobotánico de Harlem, presentó un trabajo titulado de la misma manera y comenzó diciendo: "Cuando hace 50 años escribí mi tesis sobre plantas fósiles como indicadores de clima, sabía más del asunto de lo que sé

hoy día." Lo grave es que no se trataba de una frase ingeniosa. ¡Era la purísima verdad!

Los grandes helechos arborescentes, que parecen palmeras, con troncos de tres o cuatro metros de altura cubiertos a veces, como en las selvas paraguayas y brasileñas, por vistosas orquídeas, nos hablan de bosques tropicales y húmedos. Pero Seward ha publicado una magnífica fotografía del gran glaciar de Francisco José en Nueva Zelanda tomada a través de las frondas de un bosque de helechos arborescentes que crece a menos de dos kilómetros del hielo.

Las coníferas, pinos, abetos, cipreses, son típicas de montañas y zonas frías y hasta, a veces, como en el enorme glaciar de Malaspina en Alaska, viven directamente sobre el hielo arraigadas en un colchón de escombros y tierra que lo cubren en parte. Las araucarias de la Cordillera Patagónica — Chile y Argentina —, están perfectamente bien y en su clima. Pero ¿qué hace en Misiones y en el estado de Paraná la *Araucaria brasiliensis*?

El clima bajo el cual vivieron las grandes forestas de "helechos con semillas", *Lepidodendros* y equisetos gigantes, cuyos restos dieron origen a los depósitos de carbón del hemisferio norte, ha sido a menudo interpretado como "tropical y húmedo". Pero, a decir verdad, esta idea que venimos heredando del siglo pasado no es más que el reflejo de la asociación que tenemos en nuestra mente entre "selvas exhuberantes" y "clima húmedo y tórrido". Con lo de húmedo estoy bastante de acuerdo, porque es difícil imaginar una verdadera selva sin abundante humedad. Pero lo de tórrido es otra cosa, porque también en climas fríos y húmedos existen forestas casi impenetrables. Y sino que lo diga quién haya recorrido la cordillera de Tierra del Fuego donde encontramos hasta helechos arborescentes. No es que quiera afirmar que el clima del Carbonífero europeo fué frío y húmedo, sino mostrar simplemente que aquello de "húmedo y tropical" está muy por verse.

Tampoco es fácil formarse idea de los climas pasados partiendo de los depósitos marinos y calculando la temperatura del agua en base de los restos de animales fósiles. Claro que los corales constructores de arrecifes viven hoy solamente en mares tropicales de aguas cálidas y, aunque no es demasiado segu-

ro, podemos aventurarnos a admitir que lo mismo ocurrió en épocas pasadas. "Calizas coralinas", pues, equivale a decir "clima cálido" en el continente vecino. Esperemos que los corales no hayan cambiado de hábitos en los últimos 400 millones de años... En el mar, pues, ocurre lo inverso que en el continente. Allá estábamos seguros de los climas glaciales y aquí "casi" seguros de los cálidos.

Pero recientemente se ha abierto una posibilidad muy interesante de *medir* la temperatura del mar utilizando los fósiles como termómetro. En 1951 Urey demostró que la abundancia del isótopo O^{18} del oxígeno en el carbonato de calcio, varía con la temperatura bajo la cual se formó el carbonato depositándose del agua marina. Como las conchillas de muchos animales que viven en el mar, como los moluscos y braquiópodos, están formadas por carbonato de calcio, analizando la abundancia de aquél isótopo podremos calcular, con precisión insospechada, la temperatura del agua en la cual vivieron los animales mientras extraían la sal disuelta que convertían en "esqueleto" propio.

Las primeras aplicaciones de este método han dado resultados extraordinarios. Así por ejemplo, dosando el O^{18} en la conchilla de unos curiosos moluscos parecidos a las sepias actuales, que llamamos belemnites, provenientes del Cretácico Superior de Estados Unidos, Inglaterra y Dinamarca, Urey y su escuela llegaron a establecer que la temperatura del mar, en todas esas regiones, era de unos 15 a 16 grados centígrados. En una palabra, que el mar era cálido y la temperatura casi uniforme en la faja de la cual provienen los restos estudiados. Analizando diferentes porciones de la conchilla de otro belemnite, de Jurásico de la isla de Skye, llegaron a la conclusión de que el animal vivió "tres veranos y cuatro inviernos después de su juventud" (no pudieron determinar cuánto duró la "juventud" porque la cantidad de carbonato de calcio depositada en ese intervalo era demasiado pequeña para el método). La diferencia en la temperatura del agua entre invierno y verano era de unos 6 grados y la temperatura media durante la vida del animal, de 17,6 grados. ¡Demostraron, también, que el agua del mar era un poco más caliente durante la juventud del animal que durante sus últimos años y que murió en la primavera!

Cuando estas determinaciones, que Urey prosigue en la actualidad, se conviertan en "rutina de laboratorio", podremos acumular una masa de datos que nos permitirá formarnos idea mucho más clara de los climas del pasado, de sus fluctuaciones y de su distribución en zonas. Y entonces habrá llegado el momento de teorizar en serio para explicarlos.

XV

RASCACIELOS CON ANDAMIOS

El telón se ha descorrido de golpe y nos presenta un primer cuadro con escenografía elaboradísima y multitud de actores en escena.

Estamos en el Cámbrico Inferior y en el año 500 millones antes de Cristo, sobre algunos millones más o menos. Y ante nuestros azorados ojos (y valga el adjetivo aunque suene cursi y pasatista) se despliega de pronto la primer fauna marina, como surgida de la Nada por arte de birlibirloque.

En escena están ya todos los grandes linajes de invertabrados (a excepción de los briozoarios que, no sabemos bien por qué, llegaron tarde). Y hasta quizá los primeros cordados. Allí están las esponjas, corales, gusanos, equinodermos, braquiópodos, moluscos, artrópodos, desde un principio diversificados en clases, órdenes, familias.

La vida se nos presenta así, de sopetón. La Madre Naturaleza, recordando sin duda su antigua encarnación en Isis, se niega rotundamente a descorrer el velo y a dejarnos ver cómo se las arregló para obtener este primer resultado. Lo que es peor aún, nos deja en la más enternecedora ignorancia acerca de cómo, dónde y cuándo (por favor, no agravemos más las cosas preguntando por qué) apareció la vida en nuestro planeta. Y en esta región metafísica de lo desconocido, podemos dar rienda suelta a nuestra imaginación.

La complicadísima escenografía con que comienza el primer acto de la "comedia de la vida" indica larga preparación previa

entre telones. Los tramoyistas han de haber trabajado como elefantes para presentarnos un primer cuadro tan galano y regalarnos, de entrada, con esta especie de *omelette surprise*. Han de haber sido necesarios millones y más millones de años de evolución previa, de la cual no queda ni el más mínimo rastro ya que nada sabemos de los comienzos de la vida ni de sus primeros pasos. Ninguna roca de la larguísima Era Arqueozoica nos ha brindado el más leve rastro fósil y los primeros despojos de organismos, los más viejos, se encuentran en las capas más altas de la Era Proterozoica, acumuladas en tiempos no muy anteriores al Cámbrico. Pero aún éstos nos dicen bien poca cosa ya que son restos "problemáticos": fragmentos de algo que podría haber sido parte de la caparazón quitinosa de un invertebrado, masas calcáreas arriñonadas que podrían haber sido precipitadas por la actividad vital de algas unicelulares, huellas curiosas que podrían haber sido pistas de gusanos.

Todo hace presumir que, durante los 200 ó 300 millones de años de evolución (¿o más?) que van desde la aparición de la vida hasta el comienzo del Cámbrico, los animales anduvieron desnudos. Era la "edad de oro", la época de la inocencia y de la abundancia: mucho para pocos y nadie se metía con su vecino mirándole con ojos ávidos.

Había organismos que, como lo hicieran probablemente los primeros, seguían absorbiendo energía solar "indirecta" en forma de sustancias minerales que asimilaban. Otros se especializaron en convertir directamente la energía solar, instalando laboratorios propios e inventando la clorofila. Pero llegó el día en que algunos, más cómodos, decidieron servirse del trabajo de otros y absorber "energía concentrada". Primero en forma de despojos mortales y luego, si escaseaban los originados naturalmente por el inexorable ciclo de la vida, apurando el proceso y fabricándolos por su cuenta. Y comenzó la tragedia. La carrera por comerse mutuamente y defenderse al mismo tiempo de la voracidad del vecino.

Como de común acuerdo los animales decidieron protegerse con coraza y así apareció, como arma defensiva, el "esqueleto externo", calcáreo, quitinoso, fosfático. La cueva del caracol, la armadura de los trilobites, la roca agujereada del coral, el estuche de los pelecípodos, el cuerno de los nautiloideos. Para

defenderse de las pinzas, tenazas, garras y tentáculos que se perfeccionaban rápidamente.

Esta verdadera carrera armamentista debe haber sobrevenido de golpe y haber culminado en muy corto tiempo porque no hay lenta transición entre las "faunas desnudas" del pre-Cámbrico y las "faunas acorazadas" del Cámbrico Inferior. En realidad lo de las "faunas desnudas" del pre-Cámbrico es pura inferencia. No las conocemos porque los animales no se han conservado como fósiles y suponemos que no ha sido por falta de amabilidad sino por falta de esqueleto externo o "partes duras" fácilmente conservables.

¿Qué ocurrió para desatar esta carrera? ¿Qué fué lo que provocó esta fiebre armamentista?

La Tierra es, sin duda, bastante grande, sobre todo cuando comparamos su tamaño con el de cualquier animal. Hay todavía considerable espacio disponible, tanto en la tierra como en el mar, para nuevos seres vivos y con excepción de las ciudades, donde el más especializado de los animales intenta convertirse en sardina, en el resto del planeta tanto las plantas como los animales gozan aún de cierta posibilidad de sobrevivir. Es de suponer que, en las tempranas edades de la vida, los diminutos seres que deambulaban por el mundo tenían sobrado espacio para hacerlo a sus anchas. El acrecentamiento de la "población mundial" debió ser muy lento al principio y sin duda transcurrieron muchas decenas de millones de años antes de que la densidad de población alcanzara una cifra más o menos significativa.

No sabemos dónde, en qué ambiente, se originó la vida pero parece cierto que el mar fué el primer ambiente colonizado. Y, probablemente, la vida arraigó definitivamente en la faja costera, cubierta y dejada en seco dos veces al día por las mareas, teatro de incesantes cambios químico-físicos donde se juntan litósfera, hidrósfera y atmósfera.

Larguísimo tiempo debe haber sido insumido en la colonización de esta angosta faja litoral y sólo cuando la densidad de población comenzó a hacerse algo molesta, los seres vivos migraron mar afuera. Y probablemente también río arriba y tierra adentro. Los que tomaron "el camino del mar" no se aventuraron demasiado lejos. Alejándose de la costa y hundién-

dose lentamente en las profundidades, decidieron dar por terminado su viaje allí donde comenzaban las tinieblas eternas de los grandes abismos. Poco a poco colonizaron todas las anchas plataformas continentales y los grandes mares interiores de aguas someras, pero no se aventuraron más allá de los 150 o 200 metros de profundidad, más allá de la zona de penetración de la luz solar. La conquista biológica de los grandes abismos submarinos es cosa comparativamente reciente, puesto que entre los animales que viven hoy en grandes profundidades no hay representantes de grupos extinguidos.

La lenta colonización del mar trajo aparejada una gran diversificación de tipos. Algunos animales se hicieron sedentarios, pasando su vida pegados a una roca o enterrados en la arena. Otros aprendieron a caminar y desarrollaron patas. Y otros se hicieron nadadores, desprendiéndose de la necesidad de un fondo para subsistir, pero ni aún éstos se aventuraron, en sus correrías, a descender a las tinieblas bajo los 200 metros. Eso vino mucho después.

¿Y las plantas? Sabemos tan poco acerca de las plantas primitivas que la pregunta no puede contestarse más que con adivinanzas. Hasta mucho después del Cámbrico no conocemos vida terrestre y parece que en aquellos primeros tiempos no hubo más que algas y cosas por le estilo.

Hemos llegado a las postrimerías de las Eras pre-Cámbricas. Los continentes, desgastados por milenios y milenios de erosión intensa están arrasados, desnudos, chatos y escasamente elevados sobre el nivel del mar. Sus bordes pacíficos tienen anchas fajas de mares someros (el Atlántico y el Indico no existían aún) anchos brazos de mar los surcan en varias direcciones. Estos mares playos son, en su mayor parte, geosinclinales que están llegando al final de la fase pre-orogénica, al final de la fase de acumulación, y en sus fondos pululan animales con amplio espacio para el desenvolvimiento de la vida. Estamos en una época "thalassocrática" en la cual los mares playos alcanzan máxima extensión.

Los geosinclinales entran ahora en fase de plegamiento y de levantamiento isostático. Al larguísimo período de hundimiento y acumulación sigue ahora un breve lapso —quizá no dura más de un millón de años—, durante el cual las series geosincl-

nales se comprimen, se pliegan y finalmente se elevan sobre el nivel del mar para formar enormes y altas cordilleras adosadas a los continentes o interpuestas entre ellos. Una época "geocrática" substituye a la thalassocrática, una época durante la cual "crece" la tierra firme a expensas de los mares someros, que se achican y se reducen a angostas fajas bordeando los continentes.

Y es durante este último episodio de las Eras pre-Cámbricas cuando ocurre el primer salto o, mejor dicho, la primer "aceleración" evolutiva (que conocemos). La población marina, de moderada que era con respecto a la gran extensión de los mares someros, se hace rápidamente excesiva al disminuir la superficie de éstos y sobreviene lo inevitable: la lucha por la vida. El espacio ya no es suficiente para tantos, la densidad de población se ha hecho demasiado elevada. Uno tropieza a cada momento con el vecino. Y en cuanto se descuida, le quitan literalmente la comida de la boca. Es de lo más molesto y desagradable. Tanto que uno decide eliminar a su vecino justamente cuando su vecino, pensando lo mismo, afila sus pinzas entornando contemplativamente los ojos.

Aquello se convierte en una incesante guerra de guerrillas. Todo el mundo pelea por su cuenta y a poco surgen héroes, forzudos y matones que dominan la escena armándose hasta los dientes. Los más tímidos hacen sus maletas y migran buscando climas más saludables, algunos quizá río arriba y hasta tierra adentro y otros quizá mar abajo, aventurándose un poco en las tinieblas profundas. Otros desarrollan velocidad: aprenden a correr por el fondo o a nadar como Johnny Weissmüller. Y algunos hasta inventan la retropropulsión para escapar como cohetes ante la proximidad del malo. Muchos quedaron, sin embargo, en su país natal viviendo a salto de mata, o mejor dicho a salto de piedra, en perpetuo terror de los matones, escondiéndose bajo las rocas o enterrándose en el barro para pasar desapercibidos. Y todo esto implica, como es natural, evolución "acelerada", a alta presión, porque el precio de titubear y perter tiempo es perder la vida.

Y ahora, al iniciarse el Cámbrico, el mar vuelve por sus cabales. Nuevas fosas geosinclinales comienzan a hundirse, tanto en el borde de los continentes como interpuestas entre

ellos, y el mar invade rápidamente enormes zonas que habían sido tierra firme. Un nuevo período thalassocrático sucede al geocrático. Con el mar viene la "nueva fauna", generada en las angostas plataformas del período anterior. Y la vemos aparecer "crípticamente", sin previo aviso, expandiéndose sobre los nuevos fondos de aguas someras.

Desde entonces hasta la fecha, desde la aparición críptica de la primer fauna marina del Cámbrico Inferior hasta nuestros días, la cosa es más sencilla porque tenemos abundantes fósiles, cada vez más numerosos y diversificados a medida que nos acercamos al presente. Podemos seguir con comodidad el flujo incesante de la evolución y asistir a largos períodos de progreso paulatino alternando con episodios más breves de rápida transformación.

Vemos cómo una fauna aparece crípticamente y se expande con una nueva invasión marina. Durante un largo período la vemos evolucionar lentamente, diferenciada o no en distintas provincias biológicas. Hasta que, de pronto, sobreviene uno de los períodos de intensos movimientos tectónicos, de revoluciones de la corteza, que originan el levantamiento de montañas. Perdemos un poco el hilo de los acontecimientos y cuando lo retomamos, vemos a una nueva fauna expandiéndose otra vez a medida que el mar vuelve a invadir grandes áreas continentales. Desde el principio del período Devónico vemos ocurrir lo mismo en la tierra firme y las faunas y floras terrestres transformarse rápidamente y expandirse en períodos alternantes con respecto a los de transformación y expansión de las faunas marinas. Si las montañas y los geosinclinales son, en última instancia, manifestaciones de la energía solar embotellada en el interior de la Tierra, la evolución biológica es también producto indirecto de esa misma energía solar.

Los dos primeros períodos de la Era Paleozoica, el Cámbrico y el Ordovícico, constituyen la "edad de los trilobites". Claro que hubo, junto a ellos, otros muchos invertebrados pertenecientes a casi todos los grandes grupos, pero los trilobites reinaron supremos por su variedad y abundancia. Forman un grupo de artrópodos completamente extinguido y exclusivo de la Era Paleozoica. Se parecen, aunque sólo superficialmente, a ciertos crustáceos actuales y, en particular, a los "bichos boli-

ta" que viven bajo las rocas húmedas. Su nombre hace alusión a los tres lóbulos longitudinales de su cuerpo. Su tamaño medio no pasaba de tres o cuatro centímetros, pero los hubo enanos de uno o dos milímetros y gigantes de más de un metro de largo. Exclusivamente marinos se diversificaron pronto en formas caminadoras, cavadoras, nadadoras, flotadoras y mientras algunos vivían enterrados en el barro, otros navegaban formando cardúmenes como los camarones actuales.

Durante estos dos primeros períodos del Paleozoico asistimos a una lenta y gradual evolución de las faunas y vemos cómo algunas viejas familias, vetustas y caducas, van cediendo el lugar a sangre más nueva y pujante. En el Ordovícico alcanzan los trilobites máxima abundancia pero junto a ellos aumentan también los corales y moluscos primitivos. Y aparecen los primeros vertebrados en forma de primitivísimos peces cartilaginosos.

Al final del Ordovícico un ciclo de intensos movimientos tectónicos, la llamada "revolución tectónica", convulsiona extensas fajas de la corteza terrestre, eleva los geosinclinales y dá origen a montañas imponentes. Un breve período geocrático sucede así al largo período thalassocrático del Cámbrico y del Ordovícico. El problema del "Lebensraum" vuelve a hacerse agudo y las faunas entran en rápida evolución. Y al comenzar un nuevo período thalassocrático, al iniciarse el Silúrico, vemos expandirse de nuevo al mar trayendo consigo una nueva fauna.

Los trilobites están en plena decadencia. Han perdido su hegemonía frente a nuevos tipos más evolucionados, provistos de mejores armas de ataque. Pero antes de entregarse definitivamente ensayan defensas desesperadas y se disfrazan con púas, espinas y ganchos retorcidos para parecer terribles. Porque disfrazarse de malo suele ser defensa de los débiles, inútil defensa que sólo sirve para prolongar más la agonía. Sus enemigos fueron los grandes escorpiones marinos, gigantes de hasta de metro y medio de largo, provistos de tremendas pinzas y tenazas. Estos animales, que respiraban aire y vivían ante todo en las aguas salobres de lagunas costeras, se sentían también bastante cómodos en pleno ambiente marino. Pero los peores enemigos fueron los primitivos cefalópodos, pulpos de caparazón arrollada como la de un caracol, que con sus pode-

rosos tentáculos daban buena cuenta de las endeble corazas quitinosas de los casi indefensos trilobites.

Al terminar el Silúrico otro período de movimientos tectónicos intensos, el llamado "ciclo caledónico", vuelve a levantar extensas fajas de mares someros y a interferir con el lento fluir de la evolución biológica. Y el mar Devónico trae, al avanzar de nuevo sobre los continentes, aún otra nueva fauna. Le ha tocado ahora el turno a los grandes escorpiones marinos que están en decadencia frente a los pulpos acorazados, frente a los primitivos amonites que se hacen cada vez más grandes y numerosos. Los peces, especialmente los pulmonados, alcanzan su apogeo y aparecen los primeros anfibios bien parecidos, por cierto, a aquellos peces y sin duda derivados de ellos. Y por primera vez encontramos una "flora" terrestre digna de tal nombre, si bien las plantas son aún muy pequeñas y escasas y la vegetación pobre y rala.

Al cerrarse el Devónico comienza la serie de los intensos "movimientos hercínicos" que, con intermitencias, convulsionaron la corteza terrestre durante el Carbonífero y el Pérmico, culminando al final del Paleozoico. Y la vida se transforma. En el mar los crinoideos y los braquiópodos llegan a su apogeo con abundancia de formas distintas y los océanos se pueblan de tiburones. En la tierra dominan ahora los anfibios pero aparecen ya los primeros reptiles, derivados de ellos. Pero el rasgo más notable está en la flora terrestre que aparece casi "crípticamente" al terminar el Devónico y haciéndose de pronto exuberante, culmina en las fantásticas forestas del Carbonífero con sus lepidodendros, calamites, equisetos gigantes y helechos con semillas. Es la flora que va a dar origen al carbón que hoy todavía consumimos, gastando la energía solar acumulada por las plantas del pasado.

Al cerrarse el Paleozoico culminan los movimientos hercínicos con la "revolución appalachiana" que originó, entre otras, la gran cordillera del oriente norteamericano. Un cambio fundamental se opera en la vida y al comenzar la Era Mesozoica echamos de menos muchos grupos "arcaicos" que han desaparecido sin dejar rastro. Los trilobites se han ido, junto con otros muchos animales marinos anticuados. Los anfibios están en decadencia. En cambio los amonites se encuentran en pleno

auge, así como los reptiles. Y una nueva flora substituye a la arcaica con predominancia de coníferas, cicas y otras gimnospermas.

La evolución biológica durante todo el Mesozoico es lenta y paulatina como que no hubo revoluciones tectónicas importantes que la molestara. Los amonites se multiplican extraordinariamente y dominan entre los invertebrados, para declinar poco a poco desarrollando formas estafalarias en las postrimerías de su ciclo vital. Los reptiles llegan a su apogeo. En el mar originan formas "hidrodinámicas" y los ictiosaurios ("peces-reptiles") remedan a los peces espadas de hoy día. La tierra se puebla de dinosaurios ("terribles-reptiles"), bestias enormes que alcanzan hasta 60 metros de largo. Entre ellos los hay carnívoros y herbívoros. Algunos caminan en dos patas, como enormes canguros, y otros en cuatro, como gigantescos lagartos. Y en el aire se ve aparecer a los primeros aviadores, los pterodáctilos ("membrana-dedos"), grandes reptiles voladores que alcanzaron el tamaño de cóndores. Poco después las primeras aves, al principio meros "reptiles voladores" con plumas, que pronto pierden los dientes y desarrollan pico. Y ocultándose entre las piedras y las plantas, muertos de miedo en aquel mundo de bestias inmensas y aterradoras, aparecen los primeros mamíferos, más chicos que un ratón chico.

Hacia el final del Mesozoico se nota un leve cambio en la vegetación. Todavía dominan las coníferas, los gingkos, las cicis y otras plantas con "semillas desnudas" pero, junto a ellas, aparecen ahora, sin que sepamos de dónde vienen, las angiospermas.

Y sobreviene ahora la última gran revolución tectónica, la que originó el levantamiento de las grandes cordilleras modernas y configuró el relieve terrestre de nuestros días. La fauna mesozoica desaparece de golpe. Se extinguen los amonites, los ictiosaurios, los dinosaurios, los pterodáctilos. La flora se transforma rápidamente y las gimnospermas entran en franca decadencia. En cambio los mamíferos adquieren un predominio cada vez más acentuado, correteando entre las plantas con flores que van cubriendo la tierra. Y todo remata con el hombre, aparecido hará cosa de un millón de años.

Todo esto ocurrió en 500 millones de años y al contemplar



La montaña de la Vida sobre su fuente

los cuadros del pasado nos corre frío por la espalda pensando en los disparates que no habrá de hacer la Evolución en otros 500!

Y todo eso lo hizo partiendo de... ¿partiendo de qué? De algo muy primitivo, muy elemental pero "vivo" que se originó hace muchísimo tiempo Dios solo sabe cómo". (Y la expresión, según muchos, tiene más significado literal que literario).

"Hace muchos, muchísimos años" —todas las consejas fabulosas empiezan igual—, quizá 700, 800 millones, quizá más, apareció la vida en nuestro planeta. La Tierra, en pleno proceso de rápido enfriamiento, disminuía su temperatura superficial. Las aguas comenzaban a condensarse en lluvias torrenciales y se colectaban en cuencas y depresiones formando charcas casi hirvientes. Las charcas se agrandaban, se fusionaban unas con otras formando mares y los mares océanos, a medida que las aguas se enfriaban lentamente. Y de pronto, en un momento crítico cuando "las condiciones químico-físicas fueron propicias" ¡cataplún! La Vida. La Vida en forma de una masa protoplasmática elementalísima, una especie de gelatina informe pero ¡"viva"!

Así, al menos, cuentan la historia buena parte de los biólogos y paleontólogos que, demasiado entretenidos con su propia ciencia, no han tenido tiempo de ocuparse de fantasías cosmogónicas. Y siguen creyendo a pie juntillas en el dogma Laplaciano.

Ahora todo es fácil. Una vez en posesión de este primer protoplasma nos es sencillísimo hacerlo evolucionar quieramos que no y transformarlo, en el decurso de aquellos 700 u 800 millones de años, dando origen a toda la larguísima serie de formas vivientes que rematan en el hombre, el caballo, el gorrión y las margaritas silvestres.

Curioso es que nadie se haya detenido a pensar que el imponente edificio de la vida es un rascacielos terminado al que alguien olvidó quitar los andamios. Porque hoy viven junto a seres tan especializados como el hombre y tan evolucionados como el caballo, no sólo el "protoplasma elemental" sino toda la serie que va desde los más sencillísimos protozoarios a los más complicadísimos vertebrados.

La vida es algo así como los geroglifos egipcios. En el

transcurso de los 4.000 años que van de Menes a Cleopatra, los egipcios elaboraron un sistema completo de escritura, utilizando primero signos "ideológicos", luego silábicos y finalmente alfabéticos. Pero después de haber inventado todo un sistema de signos para las letras, se olvidaron de "retirar los andamios" y siguieron usando los silábicos y hasta los ideológicos aunque, evidentemente, éstos eran ya inútiles y estaban por completo demás.

Así la vida. Y si bien hoy tenemos un edificio tan exquisitamente complejo y elaborado como un caballo o un hombre, aún viven las "etapas" intermedias, la larga serie de andamios que fué necesario emplear para terminar el rascacielos partiendo del famoso y nunca bien ponderado protoplasma inicial. Y pese a que ya están pasados de moda y completamente demás, viven en superabundancia a veces muy molesta. Porque si el período Ordovícico fué la "edad de los trilobites" y el Cretácico la de los dinosaurios, la actual no es la "edad del hombre" sino la de los insectos. Se calcula que hay actualmente más de 1.000.000 de especies vivientes de insectos, casi todas ellas representadas por millones y millones y más millones de individuos. ¡Si casi no hay metro cuadrado de suelo terrestre donde no veamos corretear una hormiga!

Este origen "único" de la vida en un momento crítico del pasado "cuando las condiciones fueron propicias para su aparición": ¿Será cierto? ¿No habrá otra posibilidad?

Naturalmente que nadie cree hoy en la generación espontánea (actual). Después de aquellas demoladoras experiencias de Pasteur nadie cree hoy que las moscas nazcan espontáneamente de la carne putrefacta ni que el heno fermentado origine bacterias y bichitos chicos. Nos sonreímos ante el mero enunciado de la idea. Pero...

Pero veamos. Olvidémonos de Laplace. Olvidémonos de nebulosas a temperaturas fantásticas y aceptemos, ¿por qué no?, una teoría cosmogónica que postule una Tierra fría *ex ovo*. Y entonces, ¿dónde está ese momento único, crucial, de delicado equilibrio químico-físico que allá en el remoto pasado se dió milagrosa y providencialmente *una sola vez* para generar la vida *una sola vez* de la materia inerte? ¿Qué hacen los "uniformitarios" que no defienden la generación espontánea

actual? ¿O es que el proceso de la aparición de la vida no es un proceso biológico como cualquier otro? ¿O es que en este caso los acontecimientos del pasado no pueden explicarse recurriendo "al lento actuar de causas actuales"? ¿O es que la aparición de la vida no es un acontecimiento?

Claro que lo es y quizá, en este caso, los uniformitarios tengan razón. Y más de la que deseen. Porque filosóficamente al menos no hay razón alguna para descartar, como imposible, la existencia actual de la generación espontánea.

Hoy conocemos "bichitos" bastante más chicos que las bacterias y los "bichitos chicos" de la época de Pasteur. Son los virus filtrables, en los cuales creíamos sin haberlos visto, hasta que el microscopio electrónico nos ha permitido "comprobarlos" y fotografiarlos. Son realmente chicos, del orden de unas pocas moléculas de albuminoides. Claro que todos son parásitos y necesitan de un huésped, animal o vegetal, para existir. ¿Todos? Todos los que conocemos. Y los conocemos porque como son parásitos nos molestan, nos enferman y nos matan. Y por eso los buscamos hasta encontrarlos. ¿No podría haberlos "suelos", virus de vida independiente, por su cuenta y riesgo? Nadie, que yo sepa, puede demostrarlo. Pero tampoco, que yo sepa, puede demostrar lo contrario. Estamos, otra vez, en el campo metafísico de lo desconocido y no es cuestión de descartar una posibilidad porque nos parezca imposible. También parecía imposible que la Tierra girara alrededor del sol...

CONTENIDO

	PÁG.
INTRODUCCIÓN	7
I. Midiendo la manzana	9
II. Curioseando en el interior del muñeco	22
III. Trompos, catalinas, mareas, choques, remolinos y nubes	39
IV. El nacimiento de Selene	53
V. Corchos en el agua	62
VI. Cuatro siglos y medio	74
VII. Y llegaron las lluvias	87
VIII. Haciendo rocas "uniformitarias"	101
IX. El reino de Plutón	110
X. En el cual se demuestra la estrecha relación que existe entre la vida privada de las montañas y una olla de puchero	121
XI. Espacio y Tiempo	137
XII. La Edad de la criatura	152
XIII. Témpanos a la deriva	164
XIV. La Antártida en el Congo	178
XV. Rascacielos con andamios	192

ESTE LIBRO
SE TERMINÓ DE IMPRIMIR
EN ARTES GRÁFICAS
BARTOLOMÉ U. CHIESINO
AMEGHINO 838 — AVELLANEDA
BUENOS AIRES
EL DÍA 17 DE MARZO
DE 1955.