

EL INTERIOR DE LA TIERRA: CAPAS CONCÉNTRICAS

La Figura 1 muestra a la Tierra con un corte, donde se observa su interior. La Tierra está formada por una serie de capas que envuelven al *núcleo terrestre*; la capa más superficial se denomina *corteza* y tiene un espesor promedio de 35 a 40 km. Todos los océanos y continentes, así como los diferentes accidentes topográficos terrestres están comprendidos en esta capa. Por debajo de ella se encuentra la capa denominada *manto terrestre*, que consiste en dos partes: la primera o *manto superior*, con un espesor promedio de 670 km, y la segunda, denominada *manto inferior*, de 2,200 km de espesor. Estas capas envuelven al núcleo terrestre, el cual, a su vez, está formado por dos capas: el *núcleo externo*, de 2,250 km de espesor y el núcleo interno, de 1,215. Este último constituye el centro de la Tierra.

Ahora bien, tanto el núcleo interno como el núcleo externo están formados básicamente de hierro con pequeñas cantidades de níquel; pero mientras el núcleo interno se halla en estado sólido, el núcleo externo está parcialmente fundido, es decir, se comporta como un fluido. La temperatura estimada para esta capa es superior a los 3,000 °C, lo cual hace que se mueva con un movimiento llamado de *convección*.

Este movimiento es muy similar al que presenta un líquido (como el agua) cuando es calentado por la parte inferior y enfriado por la parte superior. Se debe a la diferencia de temperaturas que hay en las partes inferiores y superiores del núcleo: mientras que las inferiores están muy calientes, las superiores son relativamente frías. Ahora bien, los materiales calientes tienen menor densidad que los materiales fríos y debido a la baja densidad tienden a ascender, mientras que los fríos, más densos, tienden a descender, aspecto que se ilustra en el esquema de la Figura 2.

Francisco Medina Martínez

volcanismo



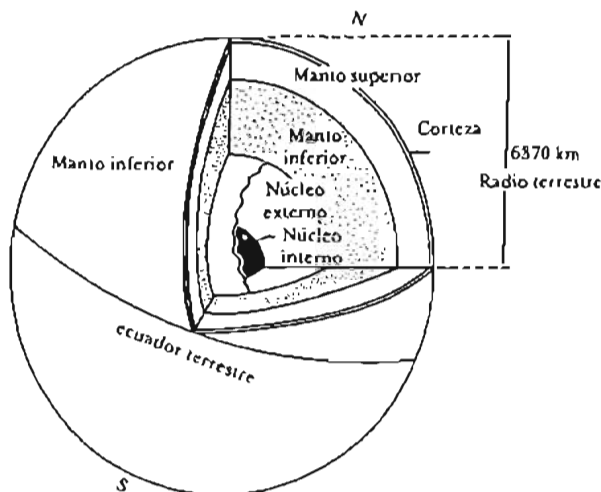


Figura 1. El interior de la Tierra está formado por capas concéntricas. La más extensa es la corteza, cuyo espesor promedio es de 35 km. Las demás capas tienen como espesor promedio: el manto superior, 670 km, el manto inferior, 2,200 km, el núcleo externo, 2,250 km y el núcleo interno, 1,215 km.

El núcleo de la Tierra tiene temperatura elevada probablemente desde que se formó, hace unos 4,500 millones de años, y se ha ido enfriando muy lentamente, pues aún conserva una temperatura muy alta. Esto se debe al manto terrestre que lo recubre, el cual está formado por una mezcla de diferentes minerales de sílice que actúan por una capa aislante muy eficaz. El movimiento de convección del núcleo externo es transmitido a las partes más bajas del manto inferior, por lo cual este tipo de movimiento también está presente en él, sólo que a una velocidad mucho más lenta que en el núcleo externo. Después, va transmitiéndose a las capas superiores hasta llegar a las situadas bajo la corteza terrestre; este aspecto se ilustra en la Figura 3. Es así como los movimientos son transmitidos a la corteza terrestre, la cual es más rígida y por lo tanto éstos producen fracturas en ella, a veces muy grandes. Esto hace que la corteza terrestre no sea de una sola pieza, como un cascarón que envuelve a la Tierra, sino que está fracturada y formada por diferentes pedazos. Cada pedazo se denomina *placa*, y las hay grandes y pequeñas como piezas de un enorme rompecabezas que forman la corteza terrestre. En la Figura 4 se ilustran las diversas placas que forman la corteza terrestre.

LAS PLACAS DE LA CORTEZA TERRESTRE

Debido al movimiento convectivo que se transmite a la corteza desde las capas inferiores, las diferentes placas se mue-

ven como grandes islas flotantes, o grandes pedazos del cascarón que envuelve a la Tierra y que "flotan" sobre un medio semifluido. Al moverse, las placas chocan unas contra otras y sus bordes interaccionan en diferentes formas.

Es conveniente explicar esta idea de las placas como islas flotantes encima de un material semifluido, ya que si no podría ser causa de confusión. El material del manto, o de la capa que está debajo de la corteza, no es exactamente un fluido, sino un sólido que tiene una pequeñísima capa semifluida. Pero los sólidos pueden llegar a tener un comportamiento similar al de un fluido al someterlos a presiones grandes durante periodos de tiempo de millones de años. Pongamos como ejemplo el caso de una viga de concreto, material evidentemente sólido, si la sometemos a una gran torsión se romperá, mostrando un comportamiento elástico; pero si aplicamos una torsión pequeña y la dejamos actuar durante decenas de años, se deformará como si fuera material plástico, esto es, como un material semifluido. De manera similar, el manto terrestre, que es sólido, puede conducirse como material plástico dado que está sometido a los esfuerzos del movimiento convectivo durante escalas de tiempo de millones de años, e incluso decenas de millones de años. Esto hace que el manto tenga comportamiento similar al de un fluido, siempre que tengamos en mente que las escalas de tiempo usa-

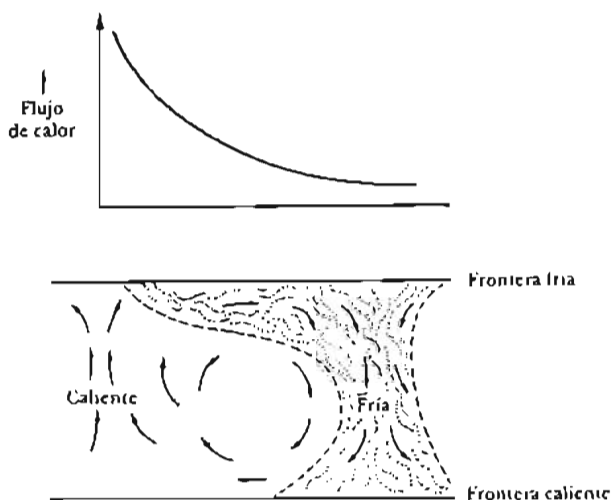


Figura 2. Cuando un fluido es calentado por su parte inferior y enfriado por la superior, se produce un movimiento en el seno del fluido denominado convección. Esto se debe a que la parte caliente disminuye su densidad y asciende por flotación, mientras que la parte fría, más densa, tiende a descender. Un fenómeno similar ocurre en el interior de la Tierra. Al medir la cantidad de calor que escapa por la frontera superior fría se obtiene un perfil como el que se muestra en la parte superior. Perfiles similares se obtienen al medir el flujo de calor que escapa por la superficie terrestre.

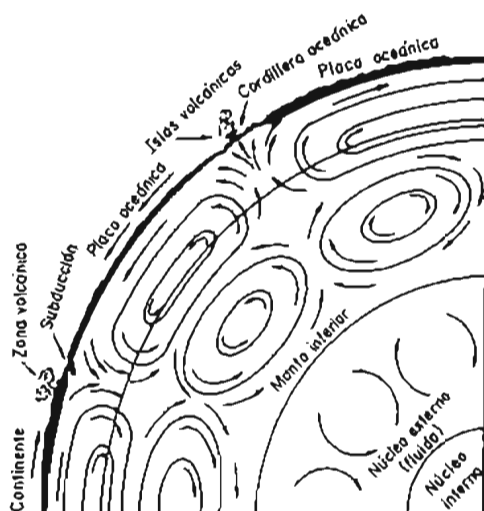


Figura 3. Esquema de los movimientos convectivos que tienen lugar en el interior de la Tierra, los cuales producen un movimiento de desplazamiento horizontal en los diferentes pedazos o placas de la corteza terrestre. Cuando las placas convergen se forma una zona de subducción; en cambio, cuando divergen se forma una cordillera centrooceánica que llega a desarrollar islas de carácter volcánico

das para observar este comportamiento son de decenas de millones de años. Si, por el contrario, usamos escalas de tiempo cortas —días o minutos—, el comportamiento que observaremos en él será el de un sólido elástico.

Cuando vamos en la carretera y pasamos junto al talud de alguna montaña podemos ver, en ocasiones, rocas deformadas y dobladas, rocas sólidas que han sido deformadas plásticamente al estar sometidas a esfuerzos de presión durante periodos de tiempo muy largos. Sirva este ejemplo para ilustrar lo que acabamos de exponer.

Una vez aclarado este punto, es más fácil entender por qué los geofísicos definen las placas, e incluso los continentes, como grandes islas flotantes en un medio fluido, aunque el interior terrestre sea sólido, a excepción del núcleo externo. Los geofísicos consideran el comportamiento del manto en lapsos de decenas de millones de años, tiempo en el cual el movimiento de convección al que está sujeto llega a producir un flujo neto. Para observar este flujo debemos esperar decenas de millones de años, pues si observamos su comportamiento en lapsos de días o minutos, el manto se comporta como un sólido. Esto último es lo que sucede cuando ocurre un sismo, aspecto que aclararemos luego.

Teniendo en mente lo anterior, los geofísicos se han percatado del movimiento de las diferentes placas: por ejemplo, una enorme cantidad de estudios han podido demostrar que África y Sudamérica estuvieron unidas hace unos 200 millo-

nes de años. Si en un planisferio recortamos estos continentes y tratamos de unirlos, al igual que las piezas de un rompecabezas, veremos que embonan en forma casi perfecta, esto se ilustra en la Figura 5.

LAS ERUPCIONES VOLCÁNICAS

Hemos escuchado, seguramente, numerosas historias acerca de las erupciones volcánicas, desde las muy impresionantes de los volcanes de Hawai, en las cuales la lava corre como un torrente líquido a gran velocidad, extendiéndose como planchas de material caliente sobre decenas de kilómetros, hasta la erupción del volcán Santa Elena, en Estados Unidos, donde el edificio volcánico se rompió por uno de sus lados lanzando un chorro o columnas de gases y material magmático fragmentado, hasta una altura de varios kilómetros, pero en la cual casi no hubo lava en forma líquida. También en el caso del volcán Chichón o Chichonal, éste arrojó a la atmósfera una columna de gases y material magmático fragmentado hasta una altura superior a los 20 km; en esta erupción hubo lava en forma líquida, sólo una lluvia de arena o material fragmentado que cubrió más de 30 mil km² y que sepultó algunos poblados, como el de Francisco León, en un fenómeno similar al que provocó el Vesubio en el año 79 a.C., cuando dejó sepultadas las ciudades de Pompeya y Herculano.

Como hemos dicho, en la erupción del Chichón o Chichonal no se produjo lava en forma líquida tal como estamos acostumbrados a ver en las películas en que se hace referencia a las erupciones volcánicas; esto se debe en gran parte a lo que ya mencionamos: la composición química de lavas de los diferentes volcanes presenta variaciones importantes.

Los volcanes de Hawai arrojan magma poco viscoso, casi líquido, debido a su composición basáltica. Ahora bien, las burbujas que se forman de gases volcánicos o de agua, en este tipo de magmas, ascienden más rápido de lo que crecen radialmente, ocasionando una liberación de gases de manera tranquila y sin explosiones. En cambio, en los magmas andesíticos, como el del Chichón, estas burbujas crecen radicalmente más rápido de lo que ascienden en el seno del material debido a que los magmas son más viscosos. Al crecer rápido, producen altas presiones en el seno del magma y ocasionan explosiones en las que el magma es lanzado a la atmósfera

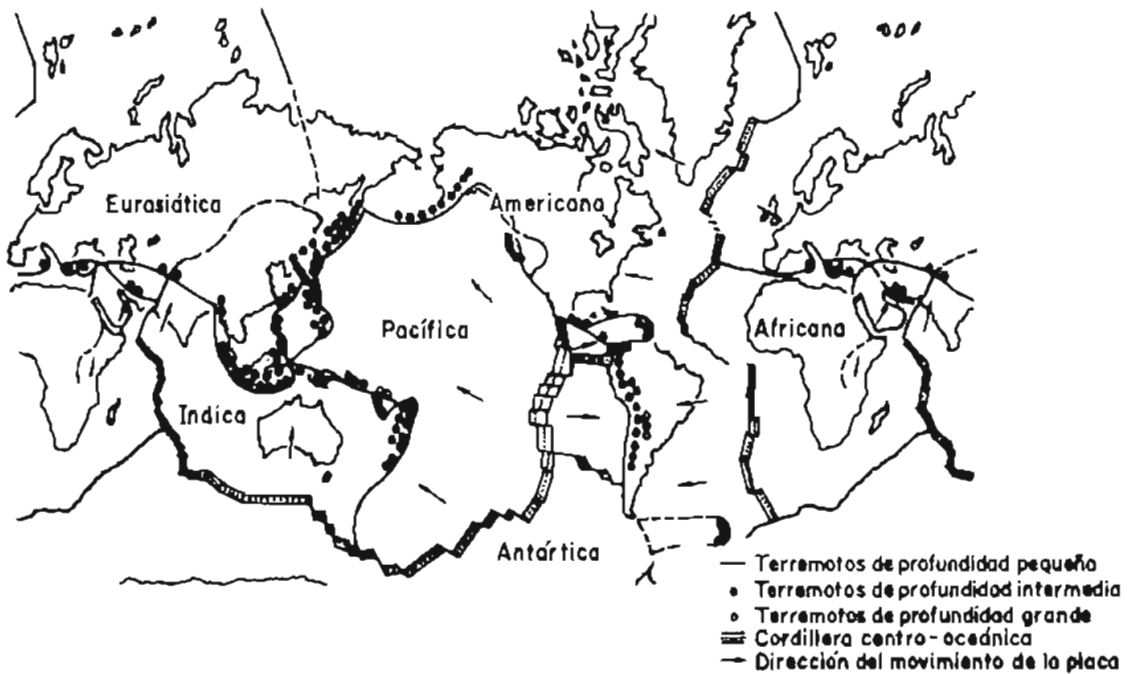


Figura 4. Las placas de la corteza terrestre. Las seis más grandes e importantes aparecen aquí con su nombre.

en forma de fragmentos incandescentes que se enfrían en la atmósfera y caen al suelo en forma de granos de arena de diversos tamaños.

El estudio de las erupciones volcánicas es bastante complejo ya que la composición de los magmas varía según se trate de diferentes volcanes, o de distintas erupciones de un mismo volcán. Incluso se llegan a presentar variaciones durante el desarrollo de una misma erupción. Por ejemplo, la composición de las lavas arrojadas al inicio de la erupción del volcán Parícutín es diferente de la que tienen las lavas arrojadas al final de su periodo eruptivo.

Este aspecto dificulta mucho el estudio de las erupciones volcánicas. Los cambios de la composición pueden deberse a la interacción del magma con los estratos geológicos en los cuales está un volcán; a que la corteza terrestre presenta heterogeneidad en su composición de un sitio a otro, etcétera. En muchos casos las variaciones en la composición son mínimas, pero pueden causar grandes cambios en el comportamiento del magma fluido, especialmente en la viscosidad del magma.

También diversos factores topográficos inciden en el comportamiento de las erupciones volcánicas, como el radio del conducto que une a la cámara magmática con el cráter, la pendiente de las paredes del edificio, la presencia de acuífe-

ros en los estratos inferiores del volcán, etcétera. El grado de explosividad de una erupción depende de la cantidad de agua, de óxidos de carbono, de óxidos de azufre, y de otros volátiles gaseosos liberados por descomposición de compuestos y minerales de las lavas y de los estratos presentes en el área del volcán. A grandes rasgos, según el grado de explosividad, las erupciones se clasifican en diversos tipos, siendo la *peleana* la más explosiva, la *vulcaniana* la menos explosiva y la *stromboleana* de un grado todavía menor.

Otro tipo de erupción volcánica corresponde a la que se presentó en el volcán Nevado de Ruiz, en Colombia, cuyos productos eruptivos sepultaron la ciudad de Armero. En estos casos, debido a que el volcán presenta gran cantidad de hielo y nieve en la cima, producto de su gran altura, al ocurrir la erupción la nieve y el hielo se funden y se mezclan con el material magmático fragmentado, formándose una especie de torrente de lodo que se desliza por las vertientes del volcán, siguiendo los ríos que se dibujan en sus faldas. A este fenómeno en el que intervienen torrentes de agua y material magmático fragmentado se le denomina *lahar*.

Así vemos cómo la cantidad de nieve o hielo que tenga un volcán, puede influir en el tipo de erupción. Ahora bien, aunque es cierto que la nieve y el hielo le restan explosividad a la erupción, también lo es el hecho de que se genera un fenó-

meno tan peligroso como el que puede producir una erupción explosiva, pues los lahares son fenómenos altamente destructivos y peligrosos.

En el desarrollo de una erupción explosiva, además de los elementos mencionados, interviene otra serie de factores atmosféricos. Por ejemplo, el viento puede desplazar las emisiones de ceniza hacia un rumbo determinado, aspecto en el cual interviene la dirección e intensidad del viento dominante durante el momento de la erupción. Por otro lado, las moléculas del aire se entremezclan con las del flujo gaseoso eruptivo y debido a la diferencia de temperaturas y a que el aire está relativamente frío, la columna eruptiva se enfriará y aumentará su densidad. Esto puede provocar que la columna se colapse y provoque derrames de piroclastos por las paredes del volcán, semejando flujos piroclásticos.

Como podemos darnos cuenta, son muchos los factores que intervienen en las erupciones, sobre todo en las de tipo explosivo, lo cual dificulta su estudio.

Hasta ahora hay varias escalas para medir el grado de explosividad de una erupción, aun cuando en todas ellas la cantidad de material arrojado por unidad de tiempo sea uno de los factores más importantes.

En ocasiones el grado de explosividad llega a ser sumamente considerable, como ocurrió el siglo pasado en el volcán Krakatoa. En este caso casi todo el edificio desapareció debido a la explosión, dejando sólo unos pequeños bordes de la parte inferior; a estos restos se les denomina *caldera*. El

volcán Krakatoa arrojó en unos cuantos minutos a la atmósfera más de 8 km^3 de material fragmentado; además, como es una isla, el agua de mar penetró en la cámara magmática y al evaporarse instantáneamente formó parte de la erupción y también se convirtió en una tremenda o *tsunami*, que causó daños considerables en las poblaciones cercanas. Hasta el momento, la erupción en la cual se ha visto mayor cantidad de material arrojado corresponde al volcán Tambora, en Indonesia, con cerca de 60 km^3 de material fragmentado.

Dado que acabamos de mencionar la cámara magmática del Krakatoa, aclaremos que la mayoría de los volcanes poseen depósitos de material magmático a unos cuantos kilómetros de profundidad debajo del edificio volcánico. Estos depósitos se forman tanto en los volcanes basálticos como en los andesíticos, y se deben a la acumulación del magma que asciende desde el manto superior por las fracturas de la corteza y se acumula en estos depósitos.

Las cámaras magmáticas son cuerpos dinámicos ya que están en constante cambio. Su profundidad y tamaño difieren mucho de un sitio a otro, pero en general la profundidad es de unos cuantos kilómetros y su volumen de algunos kilómetros cúbicos. Su dinamismo se debe básicamente a su alta temperatura, superior a los 800°C . Debido a esta temperatura se pueden descomponer muchos minerales presentes en los alrededores de la cámara magmática, dando lugar a gases como el bióxido de carbono o los óxidos de azufre, producto de la descomposición de carbonatos y sulfatos.

El agua se evapora instantáneamente a la temperatura de una cámara magmática, provocándose un flujo de vapor en el área, el cual disuelve sales y las transporta. Por esta razón, a veces las manifestaciones volcánicas también se presentan en áreas relativamente lejanas del cráter principal.

Muchos de los estudios acerca de las erupciones volcánicas son muy recientes, de hecho el estudio de las erupciones desde un punto de vista físico se inició hace poco menos de quince años. En éste se trata de medir diversos elementos para ver los factores que intervienen en forma predominante en una erupción volcánica. Sobre todo, nos interesa particularmente el estudio de las erupciones explosivas, ya que son las más peligrosas.

La erupción del volcán Chichón es una de las más estudiadas hasta el momento, y existe alrededor de un centenar de artículos científicos al respecto. Esto se debe a que la

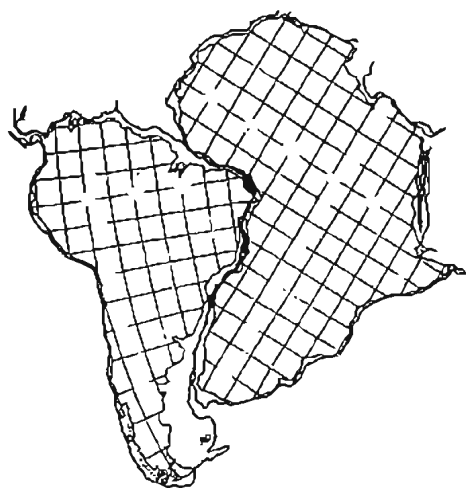


Figura 5. Posición de África y Sudamérica hace unos doscientos millones de años. En este ajuste del contorno entre América del Sur y el continente africano se toma en cuenta la plataforma marina, no el contorno de la costa actual.

columna eruptiva de este volcán, que ocurrió a fines de marzo y principios de abril de 1982, alcanzó más de 20 km de altura y tuvo serios efectos en la atmósfera. El material arrojado por el Chichón, sobre todo el de grano muy fino (menor a unas micras), permaneció en la atmósfera terrestre durante más de un año antes de depositarse nuevamente en la Tierra, y llegó a formar una gran mancha de varios kilómetros de ancho y más de 2 mil km de largo. Esto provocó variaciones en la cantidad de radiación solar que normalmente penetra por la atmósfera hacia la superficie terrestre. Además, debido a los estratos geológicos en los que se encuentra este volcán, el material magmático se contaminó con diversas sales de azufre y de cloro, materiales que perturban seriamente las reacciones químicas que dan origen a la formación del ozono.

Efectos atmosféricos y climáticos como los provocados por la erupción del volcán Chichón son poco comunes. Ya se habían visto efectos similares en 1903, a raíz de las erupciones del volcán de Colima en México y del Mont Palée en las Antillas. Estos fenómenos han llevado a los científicos a estudiar con mayor detalle las erupciones volcánicas, ya que es necesario entender mejor sus efectos en la ecología.

OTROS FENÓMENOS CONCOMITANTES A LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA

Contrariamente a lo que en general se piensa, los flujos de lava rara vez son catastróficos o destructivos; la peligrosidad de los

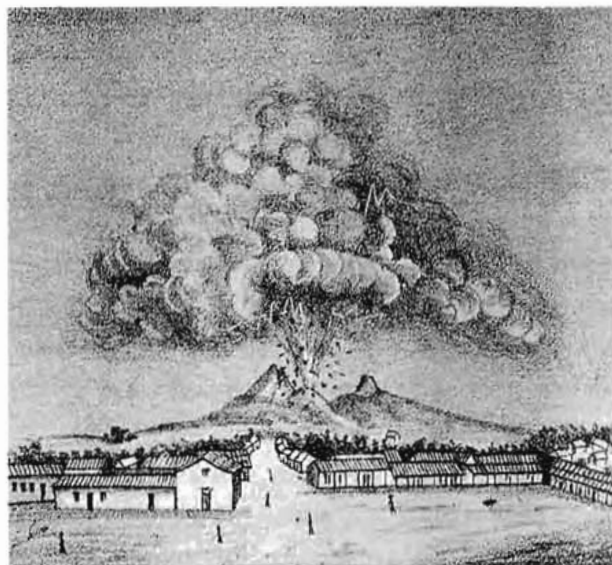
mismos depende básicamente de la topografía de la zona y de lo fluido de la lava. En el caso de México las lavas son pocas fluidas, lo cual genera derrames gruesos que alcanzan sólo unos pocos kilómetros y el avance es relativamente lento. Asimismo, la actividad sísmica rara vez es destructiva y debido a su baja magnitud es relativamente dañina dentro de un área de cuatro o cinco kilómetros alrededor del volcán.

Otros fenómenos que acompañan a las erupciones son más destructivos y peligrosos, y aunque no siempre se presentan, debe vigilarse muy de cerca su posible generación. Entre estos fenómenos se encuentra la emisión de piroclastos (fragmentos de material incandescente) que puede generar incendios de gran magnitud; si la emisión es de volumen considerable, puede hacer que los techos de las casas se colapsen por el peso. Por eso es recomendable que los techos de las casas que se encuentran en estas zonas sean muy inclinados, sobre todo cuando se sabe que el volcán suele arrojar grandes nubes de ceniza y piroclastos.

Un fenómeno mucho más destructivo es el *flujo de piroclastos*. Este proceso se lleva a cabo cuando en una erupción explosiva la columna de ceniza se colapsa, es decir, en lugar de conservar la forma de columna ascendente se hace densa y fluye por las laderas del volcán. Estos flujos pueden alcanzar grandes distancias y avanzar a velocidades de varias decenas de kilómetros por hora; como están formados por lava incandescente fragmentada y gases, van quemando y devastando todo lo que encuentran a su paso. En ocasiones los flujos tienen un espesor considerable, de hasta decenas de metros, por lo cual llegan a cubrir poblados completos; tal fue el caso de Pompeya y Herculano, en Italia, las cuales fueron sepultadas bajo densos flujos de piroclastos emitidos por el Vesubio. Un caso similar ocurrió en México con la erupción del 3 de abril de 1982 del Chichón, cuyos flujos piroclásticos sepultaron el poblado de Francisco León situado a cinco kilómetros del volcán. El alcance de estos flujos es, en general, menos de diez kilómetros, por lo que resulta recomendable que no haya poblado alguno en una distancia menor. Lo mismo se recomienda para el caso de los lahares ya mencionados anteriormente.

LA UTILIDAD DE LOS VOLCANES

La actividad volcánica desempeña un papel importante en la evolución del suelo, de la atmósfera, así como también de la



hidrosfera del planeta, por lo que no sólo debemos ver su aspecto destructivo.

La actividad volcánica se inició en la Tierra poco después de que ésta se formara; se piensa que en los primeros mil millones de años la actividad volcánica fue sumamente intensa. Esta actividad arrojó lava y gases, y estos últimos, entre los que estaba presente el vapor de agua, se incorporaron a la atmósfera terrestre.

Los océanos primitivos de la Tierra se formaron al condensarse el vapor de agua que arrojó la actividad volcánica, y muchos gases de la atmósfera primitiva de la Tierra, como el amoníaco, el ácido clorhídrico, el ácido sulfúrico, óxidos de azufre y nitrógeno, fueron también resultado de esa actividad. Así pues, los productos que arrojan los volcanes forman parte de la evolución química de la atmósfera y la hidrosfera terrestre; tal proceso evolutivo ha estado presente desde hace más de 3,800 millones de años.

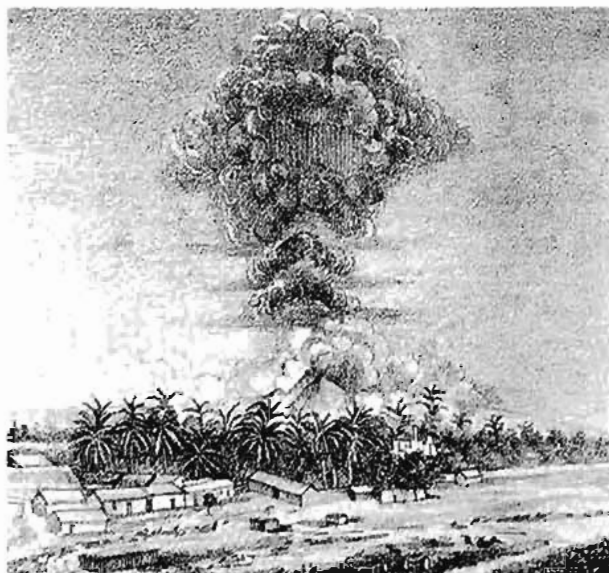
Asimismo, los productos volcánicos forman parte de la evolución del suelo. La lluvia disuelve las sales presentes en el suelo y por medio de los ríos las lleva al mar. Los productos eruptivos renuevan estas sales, por lo que no es casual que las tierras volcánicas sean muy fértiles y adecuadas para la agricultura.

En muchos casos ha podido comprobarse que meses después de una erupción la ceniza que ésta produce y que se deposita en una zona amplia, hace que las cosechas mejoren y el suelo se vuelva más productivo.

Además, la mayoría de los recursos minerales están asociados con procesos magmáticos, muchos de ellos en forma indirecta, como sucede con los procesos hidrotermales; en éstos el agua subterránea, al ser calentada por el magma, disuelve sales metálicas que posteriormente se depositan y forman fajas metalíferas.

Muchos materiales para la construcción proceden de productos volcánicos como las arenas y canteras; la piedra pómez y los vidrios volcánicos tienen un gran variedad de usos industriales pues con ellos se hacen fibras, abrasivos, materiales refractarios y aislantes, etcétera.

También son importantes los yacimientos geotérmicos, pues de ellos se extrae vapor de agua a alta temperatura para generar electricidad, por medio de turbinas, en las plantas geotérmicas. En México existen varias plantas de este tipo; la de Cerro Prieto, localizada al sur de la ciudad de



Mexicali, es una de las más grandes e importantes del mundo y genera energía eléctrica tanto para consumo nacional como para exportación.

Otra planta geotérmica está instalada en Los Azufres, en el estado de Michoacán, y otras más están en proceso de construcción, como la de los Humeros, en el estado de Puebla, y la de La Primavera, cercana a la ciudad de Guadalajara. De hecho, México parece tener un alto índice de zonas geotérmicas, muchas de las cuales aún no han sido exploradas. El vapor de agua que se encuentra en las áreas geotérmicas contiene sales de alto valor comercial. Por lo que una vez que se extrae su energía calorífica para generar electricidad, el agua es tratada para obtener dichas sales.

Desde el punto de vista científico, el estudio de los volcanes ha ayudado a entender muchos de los procesos que tienen lugar en el interior de la Tierra y el análisis de los productos volcánicos ha permitido esclarecer la composición química de las capas profundas de la corteza terrestre y del manto superior.

La mayoría de las zonas volcánicas son destinadas a parques nacionales, por lo que, en general, dichas zonas constituyen importantes reservas de la biosfera, con lo cual se fomenta la preservación de sistemas ecológicos.

(Artículo tomado del libro de Francisco Medina Martínez, *Sismicidad y volcanismo en México*, FCE-CONACYT-SEP, colección La ciencia para todos, número 151, México, 1997.)