

Las catástrofes geológicas

Juan Manuel Espíndola Castro



Para Mónica y Juanito

Instituto de Geofísica
Cuadernos del Instituto de Geofísica

Cuadernos del Instituto de Geofísica

Las catástrofes geológicas

Juan Manuel Espíndola Castro

Imágenes de
Guillermo Cisneros Máximo



Universidad Nacional Autónoma de México

Las catástrofes geológicas./ Juan Manuel Espíndola Castro.
México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, 2024.
72 p.

Ilus. 16 x 21 cm.
(Serie Cuadernos del Instituto de Geofísica)

ISBN: 978-607-30-9425-2

Editor académico

Juan Manuel Espíndola

Editora

Andrea Rostan Robledo

Diseño editorial y cuadros

Samantha Fernanda Pita Uruga

Primera edición: Septiembre 2024

D.R. © Universidad Nacional Autónoma de México

Av. Universidad No. 3000, Col. Copilco, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, CDMX

ISBN: 978-607-30-9425-2

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Impreso y hecho en México.

ÍNDICE

9	Presentación a la segunda época
---	---------------------------------

10	Prólogo
----	---------

11	Introducción
----	--------------

11	Capítulo I - Terremotos
----	-------------------------

24	Apendice I
----	------------

25	Capítulo II - Volcanes
----	------------------------

40	Apendice II
----	-------------

41	Capítulo III - Procesos de remoción de masa
----	---

53	Apendice III
----	--------------

54	Capítulo IV - Inundaciones
----	----------------------------

60	Apendice IV
----	-------------

68	Glosario
----	----------

70	Referencias
----	-------------

70	Bibliografía
----	--------------

Presentación a la segunda época

Hace más de cuatro décadas atrás se comenzó con un esfuerzo que ha rendido frutos hasta hoy en día: la publicación de la serie *Cuadernos* del Instituto de Geofísica. En ese entonces, estaba presente en la memoria de México la reciente erupción del Chichón y tres años después el sismo de septiembre de 1985, sólo por mencionar algunos hechos que dejaron una honda huella. La población en general tenía muchas preguntas que sólo la certeza de la ciencia podía resolver. También, eran necesarios nuevos instrumentos de enseñanza que fueran adecuados para introducirse a las Ciencias de la Tierra. Para ello se creó la serie *Cuadernos* a finales de los años ochenta.

El éxito de la serie fue indudable y sostenido. Se publicaron 15 títulos en total. Muchos de ellos han sido reimpresos en varias ocasiones. Su lectura ha sido obligatoria para algunas clases. Continúan creando interés, respondiendo preguntas y en ventas ha sido la indudable ganadora.

En este año, cuando el Instituto de Geofísica cumple sus 75 años, hemos decidido retomar la publicación de la serie *Cuadernos*, la cual permaneció en receso durante casi un par de décadas. Sin duda alguna, ahora más que nunca es necesario un esfuerzo extra por divulgar la ciencia, crear instrumentos nuevos de enseñanza y contribuir con la parte que nos corresponde para la concientización sobre la tierra en la que vivimos.

Se decidió trabajar en dos frentes: la publicación de nuevos títulos, y la reimpresión y actualización de otros que siguen siendo de interés. Sabemos que tenemos una ardua labor por delante. Esperamos que sea de su agrado esta segunda época de *Cuadernos*.



Prólogo

En este Cuaderno del Instituto de Geofísica el Dr. Juan Manuel Espíndola Castro nos presenta de manera sucinta y clara las principales catástrofes ocurridas en el mundo y en México durante el último lustro. El Dr. Espíndola se enfoca en cuatro tipos de catástrofes causadas por fenómenos naturales entre ellos sismos, erupciones volcánicas, derrumbes e inundaciones. Este tipo de fenómenos naturales ocurren constantemente por lo que la humanidad, dígame autoridades competentes, científicos y el público en general debemos estar lo mejor informados sobre los diferentes peligros geológicos y lo mejor preparados para poder mitigar sus efectos catastróficos. El mejor ejemplo de dicha preparación son los simulacros que hemos venido realizando el 19 de septiembre de cada año para concientizar y no olvidar los efectos que puede tener un sismo de gran magnitud como el ocurrido en 1985 en las costas de Michoacán.

En el caso de los volcanes, el Dr. Espíndola nos recuerda la peor catástrofe de esta índole que ha tenido lugar en nuestro país, que es la erupción del volcán Chichón en el estado de Chiapas. Esta erupción tuvo lugar entre el 28 de marzo y el 4 de abril de 1982, que en menos de una semana destruyó nueve poblados y acabó con la vida de unas 2,000 personas. En ese entonces se sabía muy poco sobre la historia eruptiva del Chichón; ni había ningún tipo de monitoreo continuo, ni existía protección civil en el país. Peor aún, las comunicaciones terrestres y de otro tipo eran precarias en la región. Desafortunadamente todas estas condiciones impidieron reducir el número de muertes en ese entonces. Este ejemplo nos permite entender mejor que un fenómeno natural se puede convertir en una catástrofe geológica cuando se desconoce el fenómeno y no se tiene una infraestructura adecuada para afrontarla. Si una erupción con la misma magnitud ocurriera en el volcán Tres Vírgenes en Baja California Sur, en donde habitan menos de 10,000 personas en un radio de 20 km, no tendría el mismo efecto que si ocurriera en el volcán Popocatepetl, en donde en el mismo radio habitan más de 1 millón de personas.

En esta versión actualizada del Cuaderno *Las catástrofes geológicas* el Dr. Espíndola nos presenta de manera magistral, con nuevas ilustraciones y explicaciones sencillas, aptas para toda clase de público, los daños causados por estos fenómenos. Este tercer Cuaderno de la serie cumple con uno de los objetivos primordiales de esta serie del Instituto de Geofísica, que es divulgar y difundir nuestros conocimientos a la sociedad.

José Luis Macías Vázquez

Introducción

Desde su aparición sobre la Tierra el hombre ha procurado su supervivencia a través de una lucha constante contra las fuerzas de la naturaleza. Terremotos, erupciones volcánicas, derrumbes, inundaciones, huracanes, tornados y sequías son las calamidades más frecuentes con que el hombre se ha enfrentado sistemáticamente a través de su historia. Durante mucho tiempo estos fenómenos parecieron no tener explicación, a no ser por la de tipo mítico, lo cual agudizaba el sentimiento de impotencia y pavor con que eran contemplados. Con el surgimiento del pensamiento científico se intentó darles una explicación racional, aunque sólo recientemente tales explicaciones han dejado de ser meras conjeturas para convertirse en teorías coherentes y fundadas en la observación. A pesar de que aún no se conocen con detalle los detalles de fenómenos tan complejos como la ocurrencia de temblores o de erupciones volcánicas, la ciencia ha podido encontrar las causas globales de dichos procesos. Si bien los conocimientos actuales no permiten predecir con exactitud el comportamiento de la corteza terrestre y por ende los fenómenos destructivos, también es cierto que nos permiten adoptar una actitud racional ante los mismos y reducir así su peligrosidad.

Nada es más necesario para aminorar el riesgo de una catástrofe que el conocer su origen. El hecho de ignorar el momento de su ocurrencia enfatiza la necesidad de mantener una actitud alerta ante estos eventos. El conocimiento de estos riesgos debe ser mayor en países que, como el nuestro, son tierra de terremotos, volcanes, desplazamiento de masas, fenómenos con los que debemos aprender a convivir.

Capítulo I - Terremotos

La Tierra ha sido consagrada en las páginas de la literatura universal como un símbolo de solidez. Las montañas no se mueven y las llanuras conservan su aplanamiento por siempre. ¿Por siempre? A veces, súbitamente y sin la menor advertencia, el terreno empieza a moverse, las construcciones crujen sobre sus cimientos y todo lo que se posa sobre la Tierra parece moverse como una barca sobre las aguas. El resultado de estos movimientos se traduce a menudo en grandes pérdidas tanto humanas como económicas; es evidente que los terremotos, sismos o temblores constituyen unos de los fenómenos que más vidas cobran y más daños materiales causan. El **apéndice I** muestra algunos de los terremotos más catastróficos en el mundo y en México.

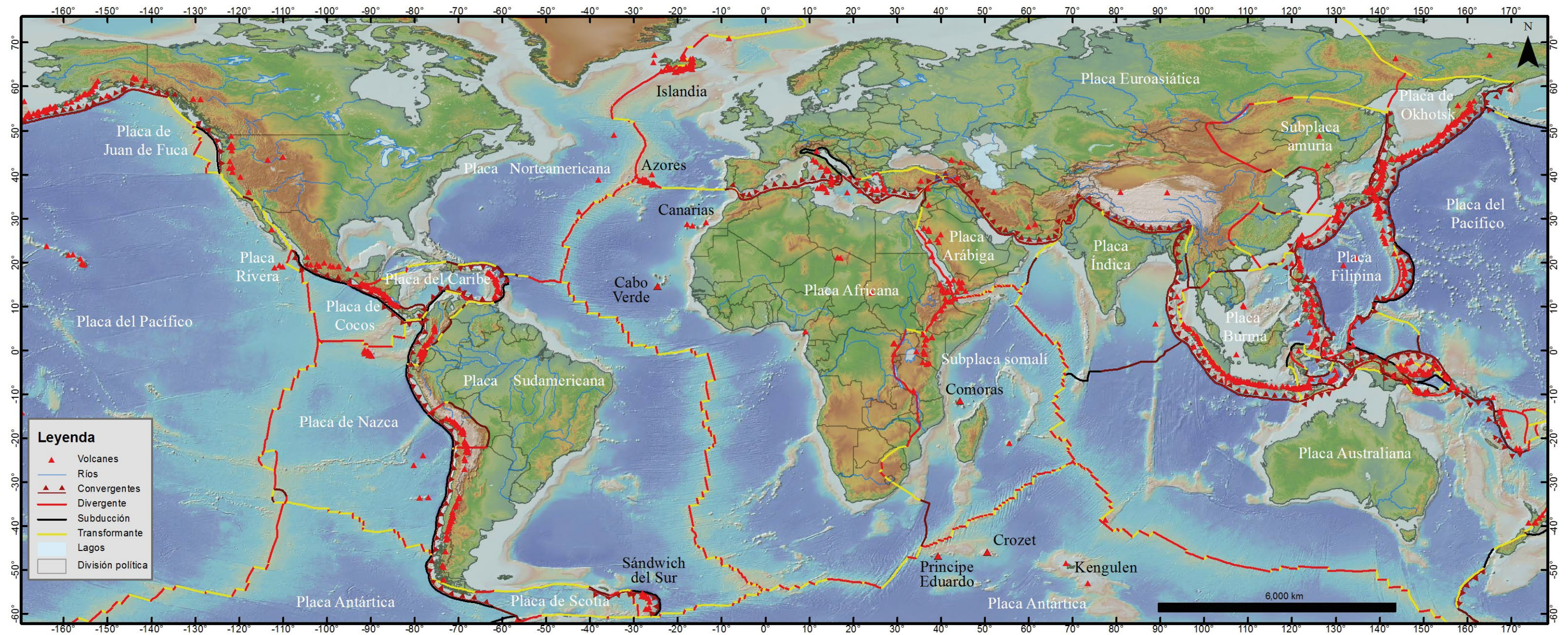


Fig. 1.1 Distribución y límites de las placas tectónicas y algunos de los volcanes más conocidos

¿A qué se deben estos movimientos? El hombre antiguo trató de explicar el fenómeno a través de sus mitos. Actualmente, los hombres de ciencia nos dan una respuesta que aun cuando es menos poética, explica las razones de su acaecer. El origen de la gran mayoría de los terremotos, nos dicen, se debe al fallamiento o ruptura de las rocas en áreas muy extensas. Las fuerzas que causan dichas rupturas son resultado de la dinámica interna del planeta, que experimenta un lento pero incesante movimiento que se manifiesta, con múltiples fenómenos, en su superficie.

El saber por qué ocurre el movimiento de la superficie terrestre sólo pudo lograrse a través de una teoría que no fue generalmente aceptada sino a principios de los años 70 del siglo pasado. Esta teoría llamada “Tectónica de Placas” nos dice, sucintamente, lo siguiente:

La Tierra, cuyo radio promedio es de 6,371 kilómetros, está dividida en varias capas. La primera o exterior, sería, en una analogía simple, la “cáscara” de la tierra sólida, y se conoce como corteza terrestre. La siguiente capa se conoce como manto y finalmente tenemos el núcleo externo y finalmente el núcleo interno. La división anterior de basa en la composición química de las diferentes capas; sin embargo, desde el punto de vista dinámico, es decir de los movimientos internos del material terrestre, la corteza junto con una porción externa del manto, se mueven como una unidad rígida que ha sido designada como litosfera. La parte baja del manto, bajo la litosfera, es llamada astenosfera.

Ahora bien, la litosfera no es una “cáscara” continua como la de una naranja. Una mejor analogía la constituye una pelota de fútbol soccer cuya superficie está cubierta por una serie de segmentos de cuero. En el caso de la Tierra estos segmentos son llamados placas, pero al contrario del balón de fútbol, su tamaño y figura es desigual de suerte que, cada placa de la litosfera posee varias fronteras que comparte con las vecinas. A medida que las placas se separan, chocan y se deslizan unas sobre otras, alimentan volcanes, generan terremotos y levantan montañas.

Así, los bordes de algunas placas se hunden bajo los de las adyacentes, formando lo que se conoce como zonas de subducción, para desaparecer en la astenosfera. Estas no son las únicas formas de contacto entre placas porque en algunos casos los movimientos de las placas son horizontales y casi paralelos, como en la famosa falla de San Andrés, en California, donde se unen las placas del Pacífico y de Norteamérica. La [figura 1.1](#) ilustra la distribución de los epicentros de los temblores más grandes, así como de los volcanes más importantes del mundo.

Podemos notar que la velocidad de las placas es de sólo algunos centímetros por año, de manera que no esperamos que la Baja California se convierta en una isla sino hasta dentro de algunos millones de años. Podemos también notar que tanto la mayoría de los temblores ocurren en el borde de las placas, donde también

se concentra el mayor número de volcanes. El movimiento relativo de una placa contra la adyacente produce compresiones y tensiones que eventualmente producen el fallamiento de las rocas y la energía acumulada es liberada como ondas sísmicas. El lector interesado puede hacer un sencillo experimento. Empuje ligeramente un mueble casero como una mesa o un sillón. El mueble permanecerá en su lugar si la fuerza que se aplica no es muy grande. Si la fuerza aumenta gradualmente se alcanzará un punto en que el mueble se desplazará produciendo las ondas sonoras que percibimos como un ruido desagradable. Una situación similar se presenta en el contacto entre placas. Las fuerzas que la Tierra misma ejerce sobre las placas haciéndolas moverse, se acumulan a lo largo de ellas hasta que se vence la fricción entre las placas y se produce un desplazamiento de una placa con respecto a la otra.

El área que sufre este desplazamiento y que hemos llamado, por razones obvias, área de ruptura, se comporta efectivamente como un emisor de ondas sísmicas que al propagarse ponen en movimiento las partículas que componen la corteza terrestre. Una analogía la constituye una piedra arrojada en un estanque, en el que produce ondas que se propagan a través del mismo. Las ondas son la forma en que se propaga la energía sin que haya desplazamiento de la materia. Por ejemplo, en el caso de las ondas en el estanque, si colocamos un pequeño corcho flotando en la superficie de las aguas, notaremos que, al paso de la onda, éste se mueve oscilando en un sentido vertical, pero no acompaña a la onda en su viaje.

El paso de las ondas sísmicas a través de la Tierra puede visualizarse imaginando una red tridimensional de partículas unidas por resortes (figuras 1.2). En una red como ésta, cualquier perturbación en un punto se propaga a través de todo el medio. En el caso de la Tierra, los resortes son las fuerzas que existen entre los átomos de la materia que compone al planeta. El resorte tiene un comportamiento al que solemos referirnos como elástico, por esto podemos decir que la Tierra se comporta como un sólido elástico. Ahora bien, en un sólido de este tipo pueden propagarse dos clases de ondas. En la primera clase se pueden presentar dos tipos de ondas: longitudinales o transversales. En el primer caso, las partículas oscilan en la misma dirección en que viaja la onda (figura 1.2 [a]). En el segundo caso, como en el caso de las ondas en el estanque, las partículas oscilan en dirección perpendicular al movimiento de la onda (figura 1.2 [b]).

Las ondas longitudinales fueron designadas como ondas P, de Primus y las transversales S, de Secundus porque las primeras viajan más rápido que las segundas y por lo tanto se observó, desde los primeros registros sísmicos, que llegan primero que las transversales. A ambos tipos de ondas se les llama genéricamente ondas internas, porque se pueden propagar en el interior de un sólido. El segundo tipo de ondas es el de las llamadas ondas superficiales porque, al contrario de las ondas in-

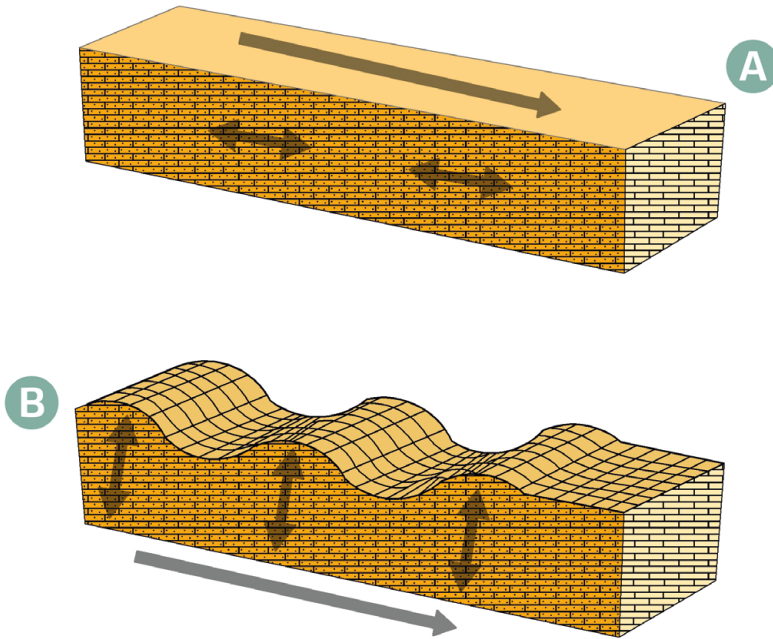


Fig 1.2 Esquema de propagación de las ondas internas. La flecha grande indica la dirección de propagación de onda; las pequeñas, la dirección de movimiento de las partículas.

ternas, sólo pueden generarse y propagarse en la superficie de un sólido elástico o en la superficie de contacto entre dos sólidos con diferentes propiedades elásticas. En el caso de la Tierra existen dos tipos fundamentales: las ondas de Rayleigh y las ondas de Love. Reciben estos nombres en honor de dos distinguidos científicos británicos que realizaron investigaciones fundamentales sobre la propagación de estas ondas. En el caso de las ondas de Rayleigh, las partículas describen trayectorias elípticas retrógradas, es decir, se mueven en sentido contrario a la dirección de propagación de la onda. En el caso de las ondas de Love la trayectoria es semejante a la de las ondas S, pero en el plano de la superficie (figura 1.3). La velocidad de las ondas superficiales es menor que la de las ondas P y S, pero su amplitud es mayor que la de las ondas internas ya que su energía no se distribuye en todo el volumen de la tierra, ya que su amplitud decrece exponencialmente con la profundidad, y de acuerdo con su frecuencia solo penetran efectivamente solo unas pocas decenas de kilómetros en el interior de la tierra, de suerte que su energía está concentrada en la superficie.

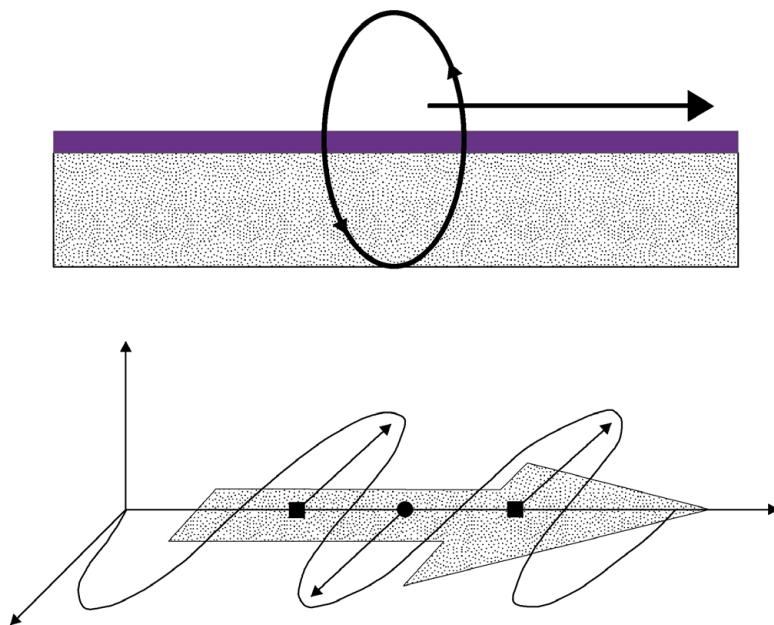


Fig. 1.3 Esquema de propagación de las ondas superficiales. La flecha grande indica la dirección de propagación de la onda; las pequeñas, la dirección de movimiento de las partículas.

Es necesario aclarar que durante un temblor se generan los cuatro tipos de ondas, aunque la proporción de energía que acarrea cada una depende de muchos factores, tales como la profundidad y características del fallamiento. Notemos que cuando estas ondas inciden sobre una construcción, ésta se verá sometida tanto a movimientos verticales como horizontales. Cuando el primero de estos movimientos es más importante que el segundo, se acostumbra hablar de un sismo “trepidatorio” y de uno “oscilatorio” si ocurre lo contrario. La importancia de cada componente depende de varios factores, entre los que pueden mencionarse: la distancia al foco (éste es el punto en que comienza la ruptura y, por ende, la propagación de las ondas sísmicas), la posición de la superficie fallada, la profundidad de la misma, la naturaleza del terreno en que se observa el movimiento, y la estructura del terreno por el que viaja la onda. Todos estos factores determinan tanto las componentes del movimiento que son más notables, como el tipo de onda que causa más daño en un sitio en particular. Así, los factores de que depende la destructividad de un temblor son en general los siguientes:

Las características de la fuente sísmica

En este inciso nos referimos tanto a las características geométricas, tales como la inclinación del plano de falla, y sus dimensiones, así como a la forma en que ocurre la ruptura. Las primeras se refieren a la posición del área de ruptura con respecto a la superficie. Los sismólogos han encontrado que las ondas P y S emitidas por una ruptura del terreno no se emiten con la misma intensidad en todas direcciones, sino que hay direcciones en que la intensidad es mayor. También han encontrado que entre más superficial es el fallamiento, mejor se generan las ondas superficiales. Con respecto a las características dinámicas de la fuente sísmica, las más importantes son su magnitud y la manera en que ocurre el fallamiento. La magnitud es una variable que nos describe el “tamaño” del temblor y puede relacionarse con la energía liberada durante el mismo. Así, un sismo de magnitud 6.5 libera una energía sísmica equivalente a la de una explosión de 30 kilo toneladas de dinamita, que es el equivalente a la bomba atómica que fue detonada en Hiroshima, Japón. La relación entre magnitud y energía no es lineal, es decir, la energía de un sismo de una magnitud dada es unas 31 veces mayor que la del sismo de magnitud inferior siguiente. En consecuencia, se requerirían unos 31 sismos de magnitud 6.5 para liberar la misma energía que uno de magnitud 7.5.

Por lo que respecta a la manera en que ocurre el fallamiento, ésta es importante, puesto que las ondas emitidas reciben sus características del desplazamiento relativo y la rugosidad entre las caras de la falla, así como de la velocidad con que se propaga el fallamiento. Quizás es necesario aclarar este último punto; pues cuando se produce un fallamiento del terreno, el desplazamiento relativo entre ambos bloques a los lados de la falla no ocurre simultáneamente a lo largo de la falla, sino que comienza en una pequeña región y se propaga generalmente en varias direcciones con cierta velocidad. Los sismólogos piensan que resistencia al movimiento que se presenta a lo largo de las fallas no es igual en toda el área, sino que existen zonas de muy alta resistencia y que son llamadas asperezas. La manera en que se irradian las ondas sísmicas para cada temblor también depende de la distribución y extensión de las asperezas.

Este modelo permite explicar un gran número de hechos observados en el fenómeno sísmico, entre ellos la existencia tanto de los temblores más pequeños que ocurren con anterioridad al temblor principal y que son llamados premonitores, como los temblores que ocurren después del principal y que son llamados réplicas. En efecto, supongamos que una alfombra sobre el suelo representa el plano de falla y que la clavamos al piso con clavos de distintos tamaños, éstos representan las asperezas. Si ahora jalamos la alfombra por una orilla, notaremos que ésta se empieza a desprender de los sitios en que se clavó con los clavos más pequeños.

En algún momento se vence la resistencia de los clavos más grandes y se desprende de estos sitios. Finalmente, vencida la resistencia más grande, los clavos pequeños que aún permanecen fijos al suelo son desprendidos sin mayor dificultad. En esta analogía, los clavos pequeños desprendidos al principio representan los temblores premonitores, los clavos grandes el temblor principal y finalmente los clavos pequeños desprendidos al final, los temblores réplicas.

La distancia de la fuente al sitio dañado

De acuerdo con lo expuesto en el inciso anterior sobre la magnitud, es claro que, dada una cantidad de energía liberada, ésta causará más daño cuanto más cerca nos encontremos del sitio. Algunos de los desastres más grandes causados por sismos fueron debidos a temblores relativamente pequeños, pero que ocurrieron en zonas muy cercanas a las ciudades destruidas. Un ejemplo de este caso lo constituye el terremoto de Managua, Nicaragua, del 23 de diciembre de 1972, que tuvo una magnitud de 6.2, pero con epicentro precisamente en la ciudad de Managua.

Otra consecuencia de la distancia entre el lugar en que ocurre un sismo y sus efectos en un sitio determinado es el proceso de atenuación de las ondas, debido a la absorción de la energía por el medio en el que se propagan las ondas. En efecto, durante su trayectoria una onda sufre la absorción de su energía, de otra manera los terremotos viajarían sin cesar en el planeta; ahora bien, la proporción en que la energía se absorbe es una función de la frecuencia de las ondas y las de mayor frecuencia resultan atenuadas más prontamente, por lo que no alcanzan a propagarse a las mismas distancias que las de menor frecuencia. Así, el terremoto del 19 de septiembre de 2017, que ocurrió a unos 125 km de la ciudad de México, experimentó el efecto de ondas de mayor frecuencia que el del 19 de septiembre de 1985 que ocurrió a más de 300 km de la ciudad.

Naturaleza del terreno

Hemos dicho que el movimiento del terreno que producen los temblores es en realidad la transmisión de una onda elástica a través del mismo. Ahora bien, cuando incide una onda en un terreno muy suave, el movimiento de las partículas que lo componen es de mayor amplitud que el de un terreno más duro, puesto que se requiere más energía en este último caso para producir el mismo desplazamiento. La amplitud del movimiento de las partículas es la distancia máxima que se desplazan éstas desde una posición de reposo por efecto del paso de la onda.

No sólo la consistencia del terreno en la superficie es importante, sino el espesor del mismo y sus dimensiones laterales. Muchas ciudades del mundo están construidas sobre cuencas en que se han acumulado sedimentos. Estas estructuras geológicas poseen un período natural de vibración. Para entender este concepto, imagine el lector que coloca un recipiente con gelatina sobre una mesa. Si ahora golpea la mesa notará que la gelatina vibra con cierta frecuencia característica, es decir, realizará un cierto número de vibraciones por segundo, que no depende de la fuerza con que se golpeó. Esta es la frecuencia natural de vibración de la gelatina que se tiene en el recipiente. Supongamos, por dar un número, que la gelatina oscila con una frecuencia de cinco veces por segundo. Entonces, el período natural de vibración es de 0.2 segundos, puesto que éste es el tiempo que le toma realizar una oscilación. Si el lector mueve ahora la mesa con esta misma frecuencia, encontrará que la amplitud del movimiento de la gelatina es la más grande que puede producirse. Cualquier otra frecuencia con que se haga vibrar la mesa producirá un movimiento de menor amplitud. En otras palabras, todos los objetos que pueden tener un movimiento vibratorio lo hacen con una frecuencia característica natural si se les hace oscilar libremente; si se les fuerza en su oscilación con una frecuencia que es igual a la natural, vibrarán con la mayor amplitud de que es capaz el objeto. A este fenómeno se le llama resonancia.

Así pues, en resumen, podemos decir, por un lado, que en un terreno suave se amplifica la vibración de las partículas y por otro, que estos terrenos, como cualquier otro, pueden presentar el fenómeno de resonancia.

La Ciudad de México es un ejemplo típico de estos fenómenos físicos. El subsuelo en el centro de la ciudad consiste en arcillas y otros materiales suaves que formaron el fondo del antiguo lago sobre el que se asentó la Gran Tenochtitlan; su período natural de vibración es de alrededor de dos segundos. El sismo de Michoacán del 19 de septiembre de 1985 generó gran cantidad de ondas transversales con períodos de dos segundos. El resultado de esto fue la resonancia del terreno durante el terremoto, de manera que se presentaron aceleraciones de hasta 0.17 veces el valor de la aceleración de la gravedad. Aclaremos este último punto:

La Tierra nos atrae con una aceleración de 9.8 metros por segundo. Esto quiere decir que, en el campo de atracción de la Tierra, por ejemplo, en una caída libre (sin contar la fricción del aire), podemos pasar de una velocidad de cero a 9.8 m/s, es decir, unos 35 km/h, en un segundo. Si la aceleración fuera de sólo un 17% de la real, en un segundo pasaríamos de cero a cerca de seis km/h. Una aceleración de 0.17 g es una aceleración muy alta si se le impone a una construcción y, si ésta no está construida para resistirla, la lleva a su colapso. En este aspecto es necesario considerar que, dado que el movimiento del terreno ocurre en tres direcciones, una

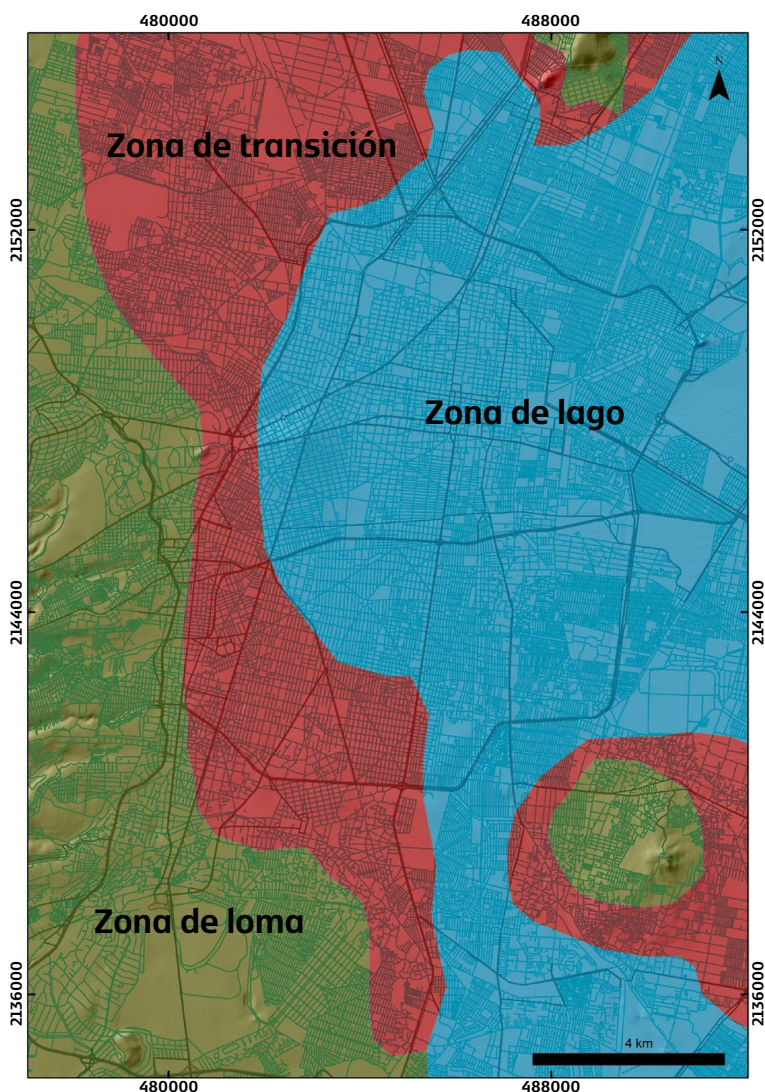


Fig. 1.4 Zonificación del subsuelo de la ciudad de México (tomando de Esteva y Rascón Chávez, 1965).

vertical y dos horizontales las aceleraciones tienen componentes verticales y horizontales. De la misma manera, las construcciones tienen diferentes resistencias a las aceleraciones verticales y horizontales; ahora bien, dado que estas deben soportar su peso, su resistencia a las fuerzas verticales son consideradas con mayor cuidado que las horizontales que con frecuencia son subestimadas. En el caso del sismo de Michoacán, las aceleraciones quizá fueron mayores para algunos edificios, que presentaron un fenómeno de resonancia, como veremos en el siguiente apartado.

El mapa de daños en la Ciudad de México demuestra que, en efecto, la mayor destrucción ocurrió en la zona del lago, mientras que en lo que se conoce como el lomerío y la zona de transición, cuyos terrenos son más sólidos, los daños fueron mucho menores (figura 1.4).

Tipo de construcción

En el inciso anterior consideramos el fenómeno de resonancia; todas las construcciones tienen a su vez un período natural de vibración. Cualquier movimiento del terreno causa naturalmente una aceleración de la construcción; si además la frecuencia del movimiento del terreno coincide con la frecuencia natural, ocurre la resonancia y las aceleraciones son aún mayores. Este efecto tuvo también lugar en la ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 1985 para edificios de entre cinco y seis pisos cuyas frecuencias naturales de vibración son de alrededor de dos segundos.

Los factores arriba mencionados explican por qué la Ciudad de México resulta tan vulnerable a terremotos aun cuando los epicentros ocurren preferentemente en la costa del Pacífico o cuando ocurren con focos cercanos a la ciudad.

Sismicidad y prevención

El 4 de febrero de 1975 un terremoto de magnitud 7.4 ocurrió en la provincia de Liaoning en China. En esta ocasión, sin embargo, se adujo que los expectantes habitantes del área se encontraban en tiendas de campaña fuera de los sitios de peligro y los daños humanos debidos al temblor habían sido mínimos. Se llegó a afirmar que los científicos chinos habían predicho el temblor a través de minuciosas y perseverantes observaciones llevadas a cabo mucho tiempo antes de la ocurrencia del mismo. Estas consideraciones desataron la actividad de sismólogos en varias partes del mundo que se apresuraron a establecer proyectos para la predecir sismos mayores con buena anticipación. Durante aquellos años se publicaron numerosos artículos sobre procesos asociados al fenómeno sísmico que podrían ser aplicados a la predicción de terremotos mayores. Se consideraron, entre otros, la observación continua de los niveles de agua en los pozos, la cantidad de gases raros emanados de los mismos, los retrasos en la velocidad de las ondas sísmicas, e incluso la respuesta de los animales a varias señales físicas. Se piensa actualmente que la evacuación temprana ocurrió por la ocurrencia de sismos menores sentidos por la población, que precedieron al terremoto principal y que todo el asunto fue una coincidencia. En todo caso, la evacuación misma, que ocurrió en pleno invierno causó una gran cantidad de decesos.

Así las cosas, todos los estudios publicados si bien contribuyeron al conocimiento sismológico, no condujo al establecimiento de una metodología que permitiera la predicción en forma sistemática; casi un año y medio después de aquel temblor, un terremoto de magnitud 7.6 causó enormes daños en la provincia de Tangshan en la misma China, sin que hubiera podido preverse su ocurrencia. A pesar de esto, algunos sismólogos no descartan que la predicción pudiera ser posible en el futuro. Mientras tanto, los esfuerzos de sismología y la ingeniería sísmica están encaminados a lograr conocimientos que, si bien no evitan los daños producidos por los sismos, los minimizan en gran medida.

En primer lugar, los sismólogos han determinado las zonas de mayor riesgo sísmico. Con base en estudios estadísticos conocen las áreas en que es más probable la ocurrencia de un temblor grande. En México, un ejemplo de estas áreas son las de Acapulco y Tehuantepec que son áreas de alto potencial sísmico como lo muestran el de magnitud 8.2 ocurrido 7 de septiembre de 2017 frente a la costa de Chiapas y Oaxaca, y el de magnitud 7.1 del 7 de septiembre de 2021.

En otro orden de cosas, los códigos de construcción apropiados reducen grandemente los daños producidos por los terremotos. Estos son revisados periódicamente, sobre todo en ciudades con alta densidad de población, y si algo bueno puede sacarse de un fenómeno tan destructivo es la información que deja y con la cual pueden mejorarse dichos códigos. Sin embargo, muchas ciudades en lugares de alto riesgo no poseen código antisísmico de construcción o el que tienen es inadecuado. Es obligación del ciudadano influir en la opinión pública para evitar esta situación.

Para finalizar este capítulo es necesario mencionar que el ciudadano ordinario puede tomar medidas que reducen el peligro en el medio en que se desenvuelve.

En primer lugar, debemos estar conscientes del riesgo que significan los terremotos. Esto no quiere decir que debamos vivir en una angustia constante, sino tomar algunas medidas pertinentes. Podemos citar, entre otras, la revisión del estado de la propia vivienda y de los lugares usuales de permanencia; la elección de los sitios más seguros en la zona y en la construcción, y en las rutas de evacuación apropiadas. Debemos también evitar el bloqueo de salidas y el colocar objetos en lugares inestables y que pueden ocasionar daños al caer. Las revisiones periódicas de las instalaciones de gas y eléctricas también son importantes para reducir el daño durante un sismo. Es también muy útil el poseer, en un lugar preciso y conocido por todos, un radio de baterías, una lámpara de mano, un botiquín de primeros auxilios, algunos alimentos y algunas herramientas como pinza y martillo. Estos últimos pueden ser útiles para clausurar líneas de gas o agua fracturadas, y otros elementos dañados que presenten un peligro en el hogar.

Apendice I

Algunos de los terremotos mundiales mas catastróficos

Fecha	Magnitud	País	Fatalidades	Comentarios
16 agosto 1906	8.6	Chile	20,000	
29 diciembre 1908	7.5	Italia	29,980	
16 diciembre 1920	8.6	China	100,000	
1 noviembre 1923	8.3	Japón	99,330	Conocido como terremoto de Kwantó.
22 mayo 1927	8.3	China	200,000	
23 diciembre 1927	5.6	Nicaragua	6,000	Managua casi totalmente destruída.
30 mayo 1935	7.5	Paquistán	30,000	La ciudad de Quetta fue totalmente destruída.
25 junio 1939	8.3	Chile	28,000	
26 diciembre 1939	7.9	Turquía	30,000	La ciudad de Erzincan fue gravemente dañada.
29 febrero 1960	5.8	Marruecos	15,000	Uno de los temblores relativamente pequeños que más daño ha causado.
31 mayo 1970	7.7	Perú	70,000	Causó el desastre de Yungay.
4 febrero 1976	7.5	Guatemala	23,000	
27 agosto 1976	7.9	China	655,237	Además 80,000 heridos; probablemente el más mortífero de los últimos cuatro siglos.
16 agosto 1978	7.7	Irán	15,000	
12 enero 2010	7.0	Haití	316,000	
6 febrero 2023	7.8	Gaziantep, Turquía		Este sismo y el siguiente, con epicentro muy cercano pero en diferentes fallas, ocurrieron separados por unas 9 horas y causaron 51,000 muertes en Turquía y 8,000 en Siria.
6 febrero 2023	7.5	Ekinözü, Turquía		
8 septiembre 2023	6.8	Azgour, Marruecos	Más de 3,000	

Algunos sismos mexicanos causantes de daños mayores

Fecha	Magnitud	Región	Fatalidades	Comentarios
7 junio 1911	7	Jalisco-Colima	45	Destruyó Ciudad Guzmán.
16 julio 1937	7	Oaxaca-Puebla	?	
29 julio 1957	7.8	San Marcos, Gro.	?	Llamado del Ángel, por haberse venido abajo el llamado “Ángel” de la Independencia en la Ciudad de México.
2 agosto 1968	7.1	Pinotepa Oaxaca	?	
30 agosto 1973	7.5	Colima	50	Grandes daños en poblados cercanos a la costa y en la ciudad de Colima.
28 agosto 1973	6.8	Oaxaca-Puebla	600	Ciudad Sedán destruida.
28 noviembre 1978	6.8	Oaxaca	?	Unos de los temblores que más información científica ha proporcionado.
24 octubre 1980	6.5	Huajuapán, Oax.	50	
19 septiembre 1985	8.5	Michoacán	10-30,000	Graves daños en la ciudad de México, Ciudad Guzmán y Lázaro Cárdenas; es el que más muertes ha causado y uno de los más grandes que han ocurrido en el país.
7 septiembre 2017	8.2	Frente a la costa de Chiapas	99	Enormes daños en Juchitán, Ixtaltepec, Ixtepec, Tehuantepec, Salina Cruz.
19 septiembre 2017	7.1	Chiautla, Puebla	228 en la Ciudad de México y 141 en otras entidades.	Daños severos en edificios de Ciudad de México, Puebla, y otras entidades.
7 septiembre 2021	7.1	Costa de Acapulco, Guerrero	14	Grandes daños en Acapulco y Chilpancingo.

Capítulo II - Volcanes

En el Cuaderno Número 1 de esta serie señalamos el hecho de que tanto gran parte de los sismos como de volcanes ocurren en los bordes de las placas. La excepción a esta distribución la constituyen algunos otros, como los volcanes hawaianos. Sin embargo, también algunas características de este volcanismo pueden ser explicadas por medio de la tectónica de placas. Actualmente se ha logrado saber que las islas hawaianas son de edades diferentes. La más joven es Hawái y la más vieja Kawai.

Los científicos suponen que columnas de magma caliente, llamadas plumas, ascienden de las profundidades, manifestándose como volcanes sobre la superficie de las placas. Estas plumas permanecen fijas por tiempo más largo que el movimiento de las placas. Así, al moverse éstas últimas lentamente, se van formando volcanes cuya edad aumenta con la distancia a la pluma (figura 2.1). Los geólogos, han establecido, además, que la composición química de sus lavas es muy particular y diferente a la de los volcanes asociados las zonas de subducción.

Independientemente de las causas del volcanismo, las características de las erupciones volcánicas dependen, entre otras, de una propiedad física del magma llamada viscosidad; con este nombre designamos a la facilidad que tiene un cuerpo para fluir. En nuestra experiencia cotidiana encontramos líquidos que fluyen fácilmente como el agua, y otros que lo hacen con menos facilidad, como el aceite. También las lavas tienen composiciones muy variadas y presentan diferencias en su viscosidad.

El granito es una roca que por su belleza es muy apreciada en la construcción. Tiene grandes cristales rosados o grisáceos y blanquecinos. El basalto, por el contrario, es una roca gris oscuro o negra. Ambas rocas, cuando se encuentran en estado de fusión, representan dos extremos en cuanto a viscosidad, el granito es muy viscoso y el basalto menos viscoso.

La viscosidad es una propiedad muy importante porque la lava que sale de un volcán contiene gran cantidad de gases. Los gases se encuentran disueltos en la lava por la gran presión a la que ésta está sujeta en la profundidad. Cuando el magma asciende a la superficie, disminuye la presión a que está sometido y el gas comienza a separarse de él. Tal comportamiento puede entenderse si observamos una bebida gaseosa embotellada. ¿Qué observamos cuando se encuentra cerrada? un líquido homogéneo, pero cuando quitamos lentamente la tapa aparecen pequeñas burbujas que ascienden a la superficie. Finalmente, cuando destapamos completamente la botella las burbujas se multiplican y en su viaje a la superficie arrastran pequeñas gotas del líquido.

Esta es una conducta semejante a la de las lavas volcánicas, pero en éstas puede ocurrir que la lava sea tan viscosa que las burbujas queden atrapadas sin poder moverse a través del magma. Este, en su ascenso sufre una menor presión y por consiguiente las burbujas en su seno aumentan su volumen hasta tocarse unas con otras, fragmentando el material. Los magmas muy viscosos son además muy ricos en dióxido de silicio y otros componentes que sólo permanecen líquidos a muy altas temperaturas. Así, el material fragmentado se solidifica rápidamente y en la parte final de su ascenso, el magma es una mezcla de gas y fragmentos de muy variados tamaños a altas presiones. Esta mezcla asciende rápidamente a la superficie y produce una erupción explosiva. Si la lava es poco viscosa, ascenderá hasta la superficie derramándose por las laderas; si su velocidad es lo suficientemente alta, formará fuentes de lava. Entre

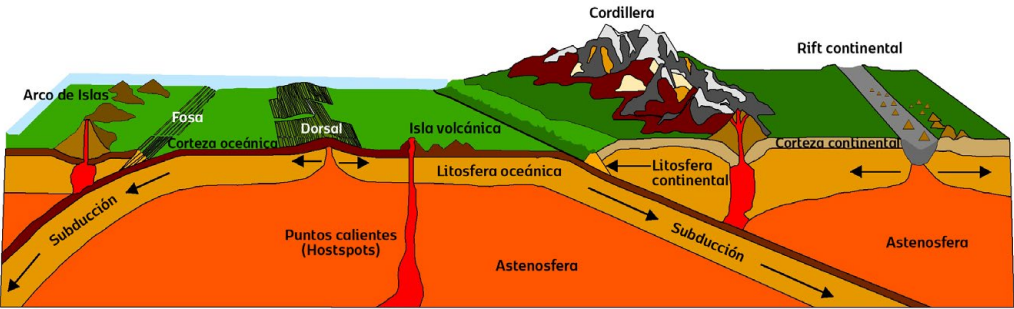


Fig. 2.1 Vulcanismo de los diferentes ambientes geológicos.

estos dos extremos existen erupciones de tipo intermedio. El geofísico suizo Adrián E. Scheidegger clasificó la peligrosidad de las erupciones volcánicas en términos de su viscosidad y el contenido de gases. Su clasificación aparece en el Cuadro I.

En esta clasificación, las erupciones del tipo hawaiano, caracterizadas por emisiones de grandes coladas de lava forman ríos y lagos, son las menos peligrosas. Las erupciones peleanas, de gran explosividad, son en extremo peligrosas. Recordemos que estas erupciones reciben su nombre de Mont Pelée (en la Martinica, isla del Caribe), que en 1902 hizo erupción, causando la muerte a los 30,000 habitantes de la ciudad de Saint-Pierre, en donde sólo dos personas sobrevivieron, una de ellas, un prisionero que había sido enviado a un calabozo bajo el nivel del suelo y que por esta razón conservó la vida, a pesar de sufrir quemaduras severas.

Cuadro I
TIPOS DE ERUPCIONES

Peligrosidad		Baja		Alta	
		Presión del gas			
	Viscosidad	Baja	Intermedia	Alta	
Baja	Baja	Islandés Hawaiano	Estromboliano	Vesubiano	
Intermedia	Intermedia	-	Vulcaniano	Perretiano	
Alto	Alto	Merapiano	Vicentiano	Peleano	

Los productos volcánicos y la peligrosidad que representan

Lava. Aunque es cierto que las erupciones con grandes emisiones de lava son poco explosivas y por lo tanto representan un riesgo menor, no es menos cierto que pueden ocasionar graves daños económicos, como lo demuestran las erupciones del Parícutín que durante su actividad, de 1943 a 1952, emitió aproximadamente 700 millones de metros cúbicos de lava y otros sólidos volcánicos que al extenderse sobre 24.8 km cuadrados de terreno cubrieron completamente los poblados de Parícutín y San Juan Parangaricutiro.

Aunque el número de muertes debidas a flujos de lavas es generalmente menor que el asociado a otros productos volcánicos, no es, sin embargo, nulo. Aun así, comparadas con otros eventos, las emisiones de lava son relativamente poco peligrosas para la vida humana. La razón de esto es que su movimiento es relativamente lento y siguen los cursos de máxima pendiente, de manera que su trayectoria puede preverse. Sin embargo, dependiendo del volumen de lava emitido, su viscosidad y las características del terreno, las lavas pueden cubrir grandes extensiones de terreno y destruir construcciones de todo tipo, así como tierras de cultivo y causar grandes daños económicos y emigración de poblaciones. Los terrenos así cubiertos son llamados malpaís o pedregales y en México pueden ser vistos en numerosas regiones. Por ejemplo, el volcán Xitle, en el sur de la Ciudad de México, que hizo erupción hace más de 2,000 años cubrió unos 70 km² y ocasionó el abandono de esos terrenos en el horizonte pre-clásico de la historia precolombina de México. Más recientemente, el volcán Parícutín, en el estado de Michoacán que fue creado a lo largo de más de nueve años desde su primera fase eruptiva en 1943 sus lavas cubrieron los poblados de Parícutín y San Juan Parangaricutiro; el primero cercano al centro emisión fue completamente cubierto, del segundo se conservaron algunas estructuras, notablemente la parte externa de su iglesia que aún puede verse sobresaliendo de las lavas. Más recientemente, la erupción del cráter Cumbre Vieja en la isla española de La palma cubrió 344 hectáreas de áreas habitadas y plantaciones, provocando la evacuación de 7,000 personas.

Excepcionalmente se emiten lavas de viscosidad tan baja que pueden cubrir grandes extensiones en poco tiempo. Un ejemplo lo constituye la erupción del Nyaragongo en Zaire, que en 1977 hizo erupción, produciendo un lago de lava que al derramarse cubrió 20 km cuadrados en menos de una hora y ocasionó la muerte de entre 60 y 300 habitantes de la región. En algunos casos, si las pendientes son muy abruptas y la lava poco viscosa, ésta puede avanzar con velocidades de hasta 48 km/hr.

Flujos de piroclastos. Como vimos con anterioridad, cuando el material magmático asciende a la superficie, la separación del gas del resto del magma puede fragmentar el material, cuando la viscosidad de las lavas es lo suficientemente alta.

Así, se produce una mezcla de gas y fragmentos de lava a muy altas temperaturas. A los sólidos de la mezcla se les llama piroclastos (esta palabra viene de las voces griegas *piros*, fuego y *clastos*, roto, quebrado) y al emerger de la boca volcánica pueden salir con la suficiente velocidad como para producir una columna que se mantiene por algún tiempo hasta que disminuye la velocidad de salida de la mezcla o se agota el material. En ese momento, la columna eruptiva se colapsa, con lo cual el material que la formaba se desplaza por las laderas del volcán con gran velocidad.

Una analogía de este efecto la presenta una manguera sostenida verticalmente. Dada la velocidad con que sale el agua, se forma una pequeña fuente; si ahora tapamos súbitamente la salida, notaremos que la pequeña columna se colapsa, deslizándose el agua sobre nuestra mano (figura 2.2). Las corrientes de material sólido, agua y gases que se producen de la manera descrita, son llamadas flujos de piroclastos.

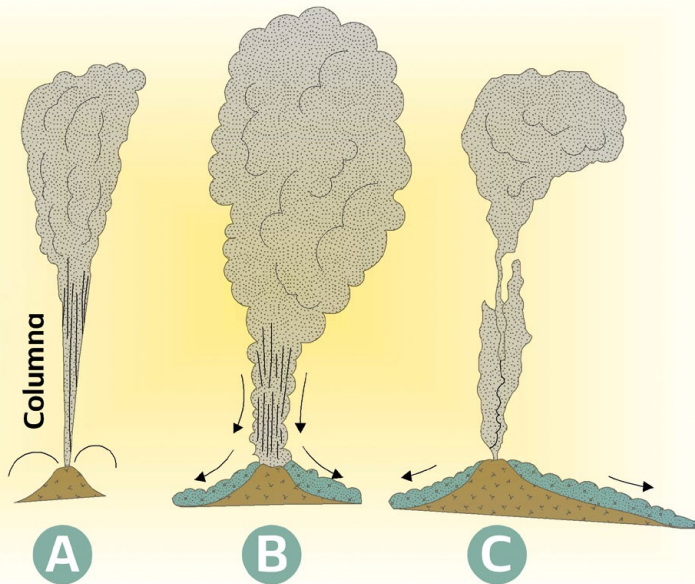


Fig. 2.2 Esquema simplificado del proceso de colapso de la columna eruptiva. a) Formación de la columna eruptiva. Fase inicial. b) Colapso de la columna eruptiva. c) Emplazamiento de depósitos.

Aun cuando no se produzca una columna de erupción, la mezcla de gas y piroclastos puede salir del cráter del volcán y deslizarse sobre sus laderas, formando a su vez un flujo de piroclastos. Estas avalanchas de material a altas temperatura y gases, entre los que abunda el vapor de agua, poseen gran movilidad y pueden

avanzar con velocidades de varios cientos de kilómetros por hora. Al igual que la lava, siguen líneas de gran pendiente, aunque, cuando su velocidad es muy grande, pueden remontar obstáculos topográficos de cierta importancia. Según el tamaño, la composición y la densidad del flujo de piroclastos, se les ha bautizado con diversos nombres. Uno de los más conocidos es el de Nube Ardiente, una de las cuales, como hemos dicho, arrasó a Saint-Pierre.

Oleadas de piroclastos. Durante las erupciones explosivas se pueden producir también lo que se conoce como oleadas de piroclastos. Estas son nubes turbulentas de material piroclástico muy fino y gases calientes que se desplazan con velocidad ladera abajo. Al contrario de los flujos de piroclastos en que los sólidos son muy abundantes, en el caso de las oleadas el porcentaje de sólidos con respecto al gas que los contiene es pequeño, a pesar de lo cual poseen gran fuerza expansiva y muy altas temperaturas.

Las oleadas de piroclastos se producen en varias formas. Una de ellas es durante la fase explosiva de una erupción, en cuyo caso puede observarse un anillo de material turbulento y poco denso que se desplaza a gran velocidad por encima de las irregularidades topográficas. Este efecto fue observado por primera vez durante la explosión termonuclear del atolón Bikini en 1946, que fue la primera prueba de la bomba “H”, llevada a cabo por los Estados Unidos. Esta observación llevó a los geólogos a suponer que dicho efecto podría tener lugar durante erupciones volcánicas, puesto que los depósitos originados por la explosión eran muy semejantes a los encontrados en los alrededores de ciertos volcanes. Tal hipótesis fue comprobada posteriormente, durante la erupción del volcán Taal en las Filipinas, el año de 1965. Las oleadas piroclásticas también pueden formarse como resultado del escape rápido de gases durante la destrucción de domos volcánicos; se conoce con este último nombre a las estructuras de materiales volcánicos formados por la solidificación de la lava que aparecen lentamente en los cráteres de algunos volcanes y que tienen la apariencia de un tapón o domo. Las oleadas también pueden aparecer como la parte menos densa de un flujo de piroclastos. En este sentido se parecen al fino polvo que suele aparecer en la parte superior de una avalancha de arena ([figura 2.3](#)).

Como la parte sólida en una oleada piroclástica es considerablemente menor que en un flujo de piroclastos, podría considerarse como de baja peligrosidad; nada más falso, estas nubes pueden ocasionar grandes daños y destruir poblaciones enteras. Su efecto es muy semejante al del procedimiento de pulido con ráfagas de arena caliente que se utiliza en varias industrias para el acabado de tuberías. Si además los gases de la mezcla son venenosos, su efecto es notablemente destructivo. Como las oleadas son muy turbulentas (de allí su nombre), su acción es

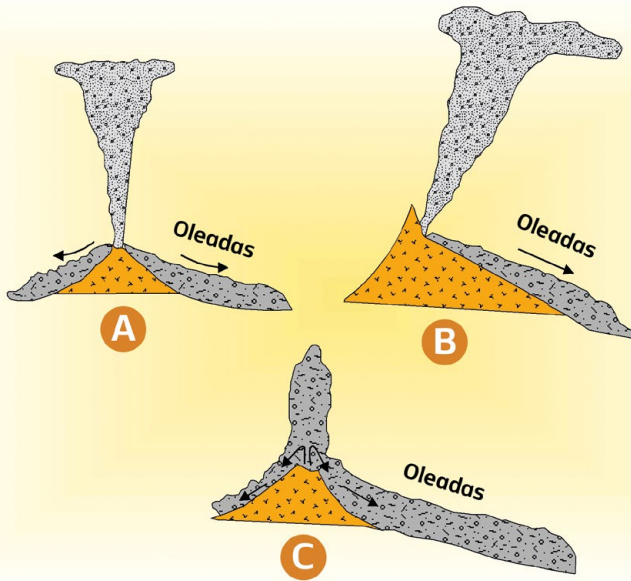


Figura 2.3. Diferentes mecanismos de formación de las oleadas piroclásticas.

en ocasiones imprevista, dejando a veces zonas muy dañadas junto a otras apenas perturbadas. En los lugares en que estas oleadas han causado estragos, se suelen observar troncos de árboles o trozos de madera carbonizados en un frente, e intactos en otro. Las oleadas piroclásticas suelen viajar a grandes velocidades, sin guiarse por la topografía, y perder súbitamente su energía. Los depósitos que dejan esas oleadas son semejantes a las dunas originadas por las tormentas de arena en los desiertos, por lo que en alguna época se les conoció como huracanes de ceniza.

Lluvias de Ceniza. Algunas de las columnas de erupción pueden alcanzar varias decenas de kilómetros e inyectar partículas muy finas en las capas más altas de la atmósfera. Tal fue el caso de la producida por la erupción del volcán Chichón o Chichonal, en el estado mexicano de Chiapas, en marzo y abril de 1982 y de la que hablaremos un poco más adelante. La razón de que una columna pueda alcanzar tales alturas se debe a que son emitidas a muy altas temperaturas y a gran velocidad, y al emerger a la atmósfera atrapan el aire circundante calentándolo, con lo que disminuye su densidad y sufre, por la diferencia de densidad, fuerzas de flotación que les permiten alcanzar alturas de decenas de kilómetros. En la parte alta de la atmósfera, generalmente son arrastradas por los vientos y viajan grandes distancias mientras van depositando el material que las compone (figura 2.4).

Por este mecanismo las nubes pueden viajar grandes distancias y depositar cenizas en lugares muy apartados. Durante la erupción del Chichón las cenizas llegaron hasta las ciudades de Veracruz y Tuxtla Gutiérrez, a unos 360 y 70 km respectivamente. Aunque las cenizas dispersadas en esta forma son poco peligrosas para la vida humana, pueden causar grandes daños económicos en una región. La ceniza depositada en los techos puede ocasionar el colapso de las construcciones, así como arruinar la producción agrícola y ocasionar enfermedades al ganado. Una capa de 10 cm de ceniza pesa alrededor de 100 kilos por metro cuadrado y aún más si está húmeda. La afectación a las personas también puede ser importante si se aspiran, ya que la ceniza es un material muy abrasivo y causa daños al sistema respiratorio. Como contrapartida, sus efectos pueden ser benéficos con el tiempo, puesto que las cenizas volcánicas son fácilmente degradadas por la acción del agua, el sol y el viento, y los derivados enriquecen el suelo. Esta es una razón por la cual las regiones aledañas a los volcanes son frecuentemente excelentes para diferentes tipos de cultivos.

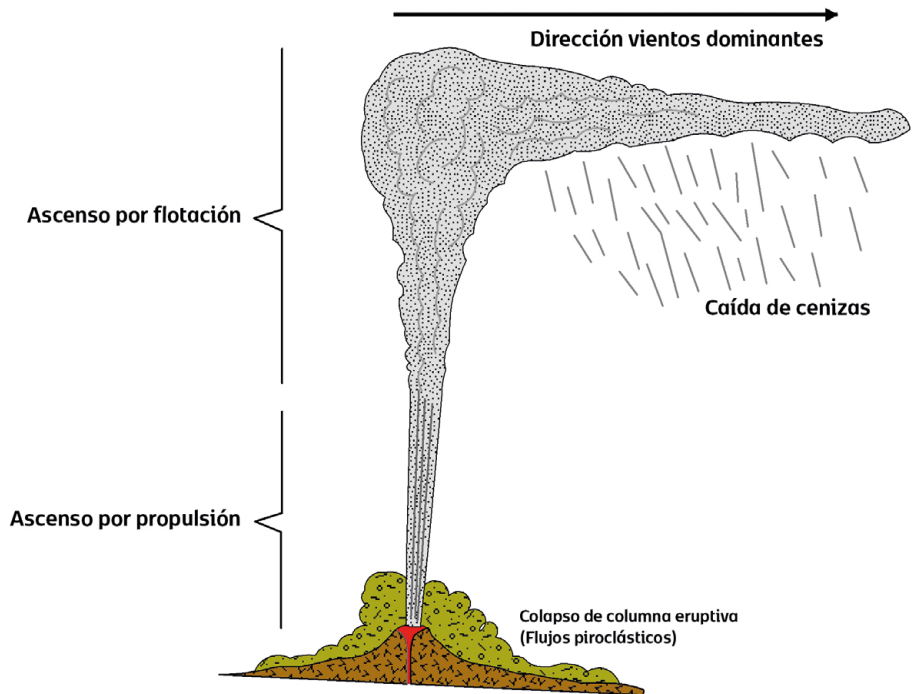


Fig. 2.4 El ascenso de los materiales de la columna eruptiva es inercial en la parte inferior y por flotación en la parte superior.

Finalmente, debemos mencionar los piroclastos de gran tamaño que abandonan la columna de erupción muy prontamente y siguen trayectorias balísticas. Estos fragmentos son en extremo peligrosos aunque generalmente su alcance no se extiende más allá de unas pocas decenas de kilómetros del cráter volcánico.

Inundaciones y lahares. En ocasiones, las erupciones son acompañadas de inundaciones y lahares, cuando se producen en volcanes en cuyos cráteres se han formado lagos o cuando están cubiertos por nieve. Con la palabra javanesa lahar, se denomina a una mezcla de varios tipos de materiales volcánicos que mezclados con agua se movilizan por gravedad siguiendo las pendientes en las laderas de un volcán. Los lahares también pueden presentarse en volcanes que carecen de casquete de nieve o de lagos en sus cráteres, cuando el material producto de una erupción cierra las vías naturales de drenaje en los alrededores del volcán o cuando se presentan lluvias muy fuertes en el área y la consiguiente mezcla con agua produce el flujo de lodo. De acuerdo con su contenido de agua y las pendientes encontradas, los lahares pueden viajar con velocidades que pueden llegar a ser del orden de varias decenas y aún cientos de kilómetros por hora y por distancias hasta de varios cientos de kilómetros. En el Ecuador, la erupción del volcán Cotopaxi, en 1877, ocasionó un lahar que se extendió a lo largo del lecho de un río por 300 km. En Colombia, la erupción del volcán Nevado de Ruiz, en 1982, ocasionó un lahar que se deslizó a 35 km/h hacia el poblado de Armero, a unos 50 km de distancia, segando la vida de sus 20,000 habitantes.

Gases volcánicos. Los magmas contienen gases que son liberados durante la actividad volcánica y sobre todo durante el clímax de la erupción. Los gases son principalmente vapor de agua, dióxido y monóxido de carbono y varios compuestos de azufre, cloro, flúor y nitrógeno en diferentes proporciones, con el vapor de agua en mucho mayor proporción que los demás. Estos gases presentan diferentes grados de peligrosidad, el monóxido de carbono, por ejemplo, es tóxico. El bióxido de carbono, aunque no es tóxico, puede causar la muerte por asfixia al desplazar el aire. Este efecto puede ocurrir con gran facilidad, puesto que al ser más pesado que el aire se desplaza cuesta abajo y llena depresiones donde pueden perecer asfixiados personas y animales, ya que su carencia de olor lo hace indetectable. Los otros gases son también muy venenosos, aunque su presencia puede ser detectada por los olores característicos que poseen, como el típico olor a huevo podrido del sulfuro de hidrógeno. También pueden reaccionar formando ácidos que son transportados como aerosoles y ocasionan quemaduras en los ojos y piel, e irritaciones del sistema respiratorio.

En agosto de 1986, unas 1,800 personas, habitantes de varios poblados alrededor del lago Nyos en Camerún, murieron en condiciones al parecer inexplicables. Todos murieron repentinamente sin mostrar signos de pánico. Pudo luego

determinarse que las muertes se debieron a la asfixia por inhalación de bióxido de carbono. El lago Nyos es un cráter volcánico y se cree ahora que el gas provino de una erupción freatomagmática en el fondo del lago. Estas erupciones explosivas son causadas por la evaporación súbita del agua subterránea cuando hace contacto con el magma caliente que existe bajo los volcanes.

Las erupciones del Chichón en 1982

Algunos de los aspectos que hemos expuesto hasta aquí son ilustrados claramente por las erupciones del Chichón, una de las erupciones más violentas y dañinas que se han presentado en la historia de México, por este motivo nos referimos a ellas brevemente.

En diciembre de 1981, los habitantes de las inmediaciones del Chichón, un volcán en el estado de Chiapas (17°21' Lat. N, 93°13' Long. O) y de relieve poco notable, comenzaron a sentir temblores persistentes en el área. Estos continuaron durante los meses de enero, febrero y marzo de 1982 llenando de zozobra a los habitantes de la región, hasta que el día 28 de este último mes una gran erupción produjo una columna de unos 18 km de alto. Esta erupción ocasionó lluvias de cenizas y piroclastos en los poblados circundantes, algunos de los cuales se encontraban a sólo unos kilómetros del cráter, causando pánico y desconcierto entre la población. Algunos de los habitantes abandonaron sus hogares y se dirigieron a poblados grandes más lejanos y aún a las ciudades de Tuxtla Gutiérrez y Villahermosa. Los días siguientes fueron de gran incertidumbre y confusión. Ante la ausencia de una voz autorizada y calificada para aconsejar, y la contradictoria información de la prensa, mucha gente optó por volver a sus propiedades. Mientras tanto, el ejército patrullaba la región, aunque sin poner en efecto operaciones de protección civil, puesto que el plan operativo en dichos casos, el plan DN-3, que puede ser puesto en operación solamente por el presidente de la República, no había sido decretado. En este estado de cosas, las noches del 3 y 4 de abril ocurrieron dos grandes erupciones de gran violencia. La columna eruptiva de esta última alcanzó más de 20 km de altitud e inyectó gran cantidad de partículas en la estratosfera. Este hecho hizo de las erupciones del Chichón, por sus efectos en la atmósfera, unas de las más importantes del siglo.

Desde un punto de vista social, las erupciones tuvieron un impacto destructivo tremendo. Varios poblados quedaron cubiertos por flujos de piroclastos de varios metros de espesor, entre otros, los poblados de Francisco León, San Isidro Tanchichal y El Volcán (figura 2.5).

El poblado de El Naranjo, en la cima de una pequeña meseta a unos ocho kilómetros del cráter, resultó completamente arrasado por las oleadas piroclásticas. En enero de 1983, diez meses después del paroxismo volcánico, El Naranjo

aparecía aún en la cima como un triste recuerdo de la violencia de la Tierra. Entre las cenizas volcánicas y restos de las viviendas, los que pudieron visitar el lugar, podían encontrar aún algunas blancas osamentas de quienes perdieron la vida en aquella ocasión. Las vidas humanas segadas por el volcán se contabilizaron, aunque sumariamente, en alrededor de 2,000; asimismo, la actividad económica de la región resultó severamente dañada y miles de campesinos tuvieron que ser reubicados lejos de la tierra en que nacieron y en la que tenían todas sus pertenencias. Un área de unos 30,000 kilómetros cuadrados, de los cuales 153 quedaron completamente devastados, fue cubierta por una capa blanquecina de cenizas de por lo menos un milímetro de espesor.

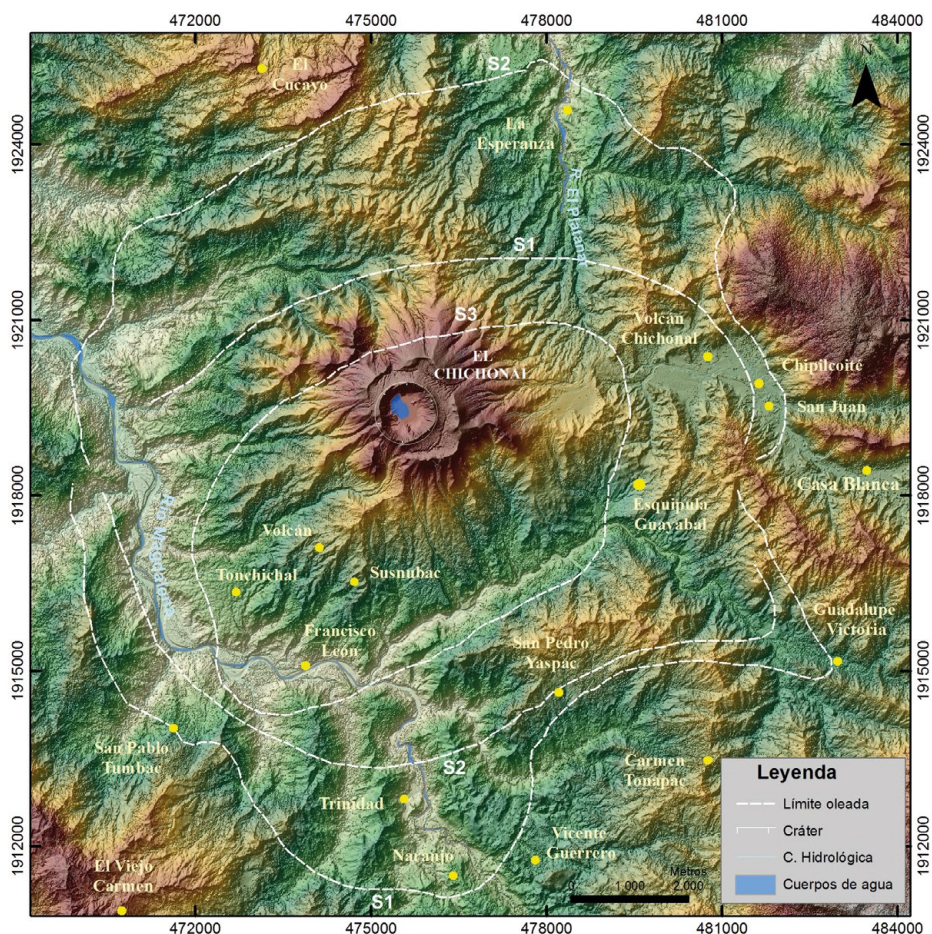


Fig. 2.5 Distribución de piroclastos de las erupciones de marzo y abril de 1982 en el volcán Chichónal.

Finalmente, el material acumulado en el cauce del río Ostuacán formó una presa que se desbordó el 26 de mayo del mismo año formando un lahar con temperaturas de hasta 60°C que se desplazó hacia el poblado de Ostuacán, en donde afortunadamente no ocasionó daños, gracias a la vigilancia e intervención del ejército, que llevó a los habitantes a las partes más altas de la región. Sin embargo, en su camino hacia el golfo de México llegó aún con grandes temperaturas a la presa de Peñitas donde causó daños a las instalaciones, y más lamentablemente, la muerte de un trabajador y quemaduras severas a otros dos. El Chichón, cuya cima era zona de cultivos, presentaba luego de esas erupciones un cráter de cerca de un kilómetro de diámetro con un hermoso lago azul turquesa, y que, con el aporte de las aguas meteóricas es actualmente verdoso.

Mitigación del riesgo volcánico

Las erupciones volcánicas, sobre todo las explosivas, son otros de los fenómenos cuya ocurrencia es difícil de predecir. Volcanes como el Chichón pueden permanecer en reposo por 500 años y luego entrar en una fase eruptiva. Sin embargo, al contrario de los temblores cuyos epicentros son también desconocidos, los volcanes que presentan riesgo tienen una ubicación conocida. Algunos volcanes, como el Parícutín, pueden nacer súbitamente; sin embargo, los casos de este tipo son mucho menos frecuentes. Aun así, los volcanes como el Parícutín, llamados monogenéticos, porque no tienen repetidos periodos de actividad, aparecen asociados a otros del mismo tipo en grandes campos, llamados también monogenéticos, en los que la probabilidad de nacimiento de un nuevo volcán no es despreciable.

El vulcanismo explosivo está generalmente asociado a volcanes que han hecho erupción en el pasado; algunos, como el Santa Helena en los Estados Unidos, después de un reposo de 1,500 años. Así pues, volcanes que han presentado erupciones al menos en los últimos 50,000 años presentan un riesgo latente.

La actividad pertinente para mitigar estos riesgos incluye varios aspectos que pueden clasificarse de la siguiente manera:

1) Zonamiento y elaboración de mapas de riesgo volcánico y uso del terreno.

Esta actividad consiste en el estudio de los depósitos que dejaron las erupciones previas de un volcán dado. Con estos estudios, los científicos pueden averiguar la edad y tipo de las erupciones antiguas. Con los datos obtenidos, los conocimientos teóricos y el comportamiento actual del volcán, los científicos pueden confeccionar mapas en los que se señalan las áreas sujetas a la acción de los diferentes peligros que hemos visto. Corresponde después a las autoridades el diseñar reglamentos de uso del terreno para destinarlo a las actividades más apropiadas.

2) Vigilancia.

La vigilancia de los volcanes activos debe ser permanente y consiste en el análisis sistemático de datos geofísicos, geológicos y geoquímicos. Estos incluyen la operación continua de sismógrafos e inclinómetros, así como de mediciones sistemáticas del valor de la gravedad y del campo magnético, y de las temperaturas alrededor del volcán. Los análisis geoquímicos incluyen el análisis de los gases de las fumarolas y solfataras, así como de las aguas de manantiales aledaños y las variaciones de gas radón liberado en la superficie.

La actividad volcánica asociada a una erupción comienza mucho antes de que ésta se presente. El transporte de magma desde las profundidades de la Tierra ocasiona una serie de cambios que si son detectados en la superficie constituyen una advertencia del peligro inminente. En particular, el movimiento del magma ocasiona temblores de varios tipos cuya ocurrencia es preciso registrar para análisis posterior. Asimismo, el terreno se “hincha” y los inclinómetros y gravímetros nos dan señales de esto, detectando pequeñas inclinaciones del terreno y cambios en la gravedad. Por otra parte, las tensiones a que el terreno se somete por efecto de la inyección de magma ensanchan los conductos en las rocas provocando su fracturamiento facilitando vías por las cuales fluyen diversos tipos de gases magmáticos hacia la superficie, donde pueden ser detectados. Existen otros métodos en vías de experimentación que prometen ser auxiliares útiles para la vigilancia volcánica, por ejemplo, la detección del gas radón. Dicho gas proviene del decaimiento radioactivo del uranio presente, bien sea en muy pequeñas cantidades, en todas las rocas y que migra continuamente hacia la superficie a través de pequeñas fracturas en las mismas. Cuando las rocas están sujetas a tensiones o compresiones, las fracturas se agrandan e interconectan, de manera que el gas escapa con mayor facilidad hacia la superficie, donde puede medirse el aumento en su salida si se vigila el área sistemáticamente.

No siempre los cambios en estas propiedades indican una erupción violenta; sin embargo, los datos de los diferentes métodos permiten evaluar con menos ambigüedad la peligrosidad del estado de un volcán cuando éste ha entrado en actividad. Un volcán puede entrar en actividad incluso eruptiva sin que ésta llegue a resultar de consecuencias catastróficas; pero la estimación de su posible evolución es lo que constituye el problema más importante de la volcanología preventiva. En esta tarea son de fundamental importancia los datos anteriores colectados continuamente y el análisis de los materiales arrojados durante la erupción cuyo curso se desea evaluar.

Los volcanes activos en México

De la [figura 2.6](#), el Popocatepetl, el Tacaná, el volcán de Colima y el Chichón tienen un mínimo de vigilancia. Todos los demás constituyen un peligro, cuyo riesgo no ha sido ampliamente valorado. Es de desearse que en el futuro el país

cuenta con mayores recursos tanto económicos como humanos para realizar esta tarea cuya necesidad sólo sería conspicua si, esperemos que no, ocurre una nueva erupción volcánica.

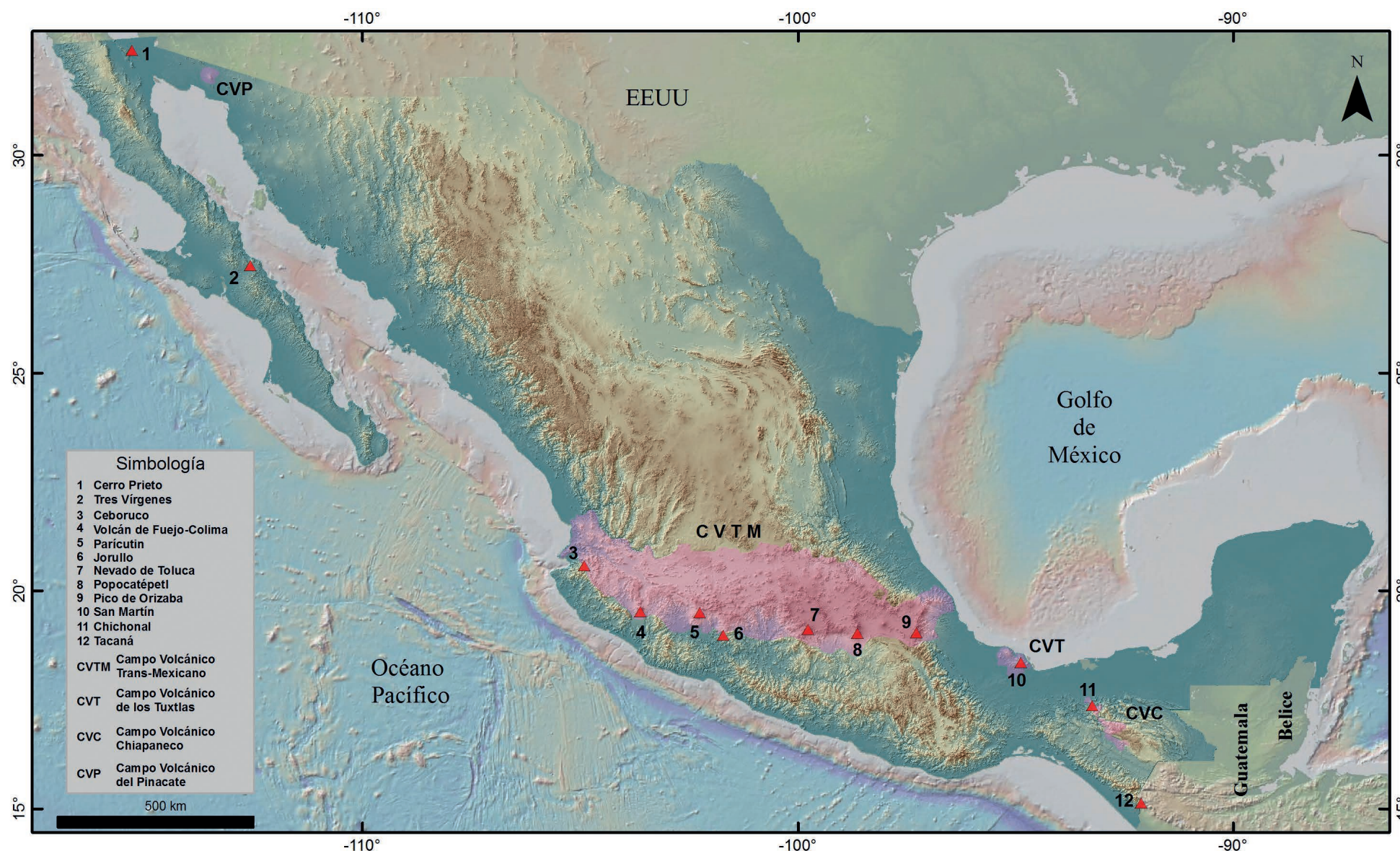


Fig. 2.6 Algunos de los volcanes más activos del área continental de México.

Apendice II

Algunas erupciones históricas

Volcán	Fecha	Comentarios
Santorini, antigua Thera, Mar Egeo	1 500 A.C.	Esta tremenda erupción causó grandes tsunamis, que alcanzaron las costas alrededor del mar Egeo. Ocurrió 50 años antes de la caída de la civilización cretense y se piensa que es el origen de la leyenda de la Atlántida.
Vesubio, Italia	79 A.C.	Sepultó las ciudades de Pompeya y Herculano.
Tambora, Indonesia	1815	92,000 muertes. Formó una caldera de 6 km. de diámetro y fragmentó el edificio volcánico, reduciendo su altura de 4,000 a 2,850 m.s.n.m.
Krakatoa, Indonesia	1883	La erupción causó tsunamis que ocasionaron la muerte de 40 mil personas; la columna eruptiva se levantó 35-50 km y formó una caldera de 6 km de diámetro.
Cotopaxi, Ecuador	1877	Produjo un lahar de 300 km de largo.
Mont Pelée (Antillas Francesas)	1902	30,000 muertes. Destruyó la ciudad Saint-Pierre.
Sakura-jima, Japón	1943-52	Nacimiento del volcán en un campo de cultivo; destruyó varios poblados.
Surtsey, Islandia	1963	Erupción submarina que creó la isla de Surtsey.
Taal, Filipinas	1965	Erupción freatomagmática en un cono situado en el lago Taal. Las cenizas cubrieron un área de 60 km ² .
Arenal, Costa Rica	1968	Erupción explosiva que duró 15 días. Mató a 87 personas y sepultó 3 pequeños pueblos, Tabacón, Pueblo Nuevo y San Luís. Afectó más de 232 kilómetros cuadrados de territorio.
Santa Helena, E. U. A.	1980	Erupción lateral que ayudó a comprender varios aspectos del mecanismo eruptivo y los depósitos dejados en estos eventos. Causó 30 muertes.
Chichón, México	1982	Causó alrededor de 2,000 muertes e inyectó gran cantidad de aerosoles en la estratósfera por lo que se le considera una de las más importantes del siglo.
Nevado de Ruiz, Colombia	1982	Produjo un lahar que destruyó el poblado de Armero, matando a sus 20,000 habitantes.

Volcán	Fecha	Comentarios
Pinatubo, Filipinas	1991	Erupción pliniana que formó una columna eruptiva que llegó a alcanzar 40 km de altura y cientos de kilómetros de diámetro. Produjo además flujos piroclásticos junto con la concurrente presencia del tifón Yunya produjo inundaciones y veloces lahares que afectaron a cerca de dos millones de personas, principalmente por la caída de ceniza que afectaron los cultivos.
Kilahuea, Hawái	2018	Destruyó 900 casas con un costo estimado de recuperación de 900 millones de dólares.
Mauna Loa, Hawái	2022	No hubo pérdida de vidas humanas y los daños se estimaron en 1.5 millones de dólares.
Cumbre Vieja, La Palma, Islas Canarias, España	2021	Destruyó más de 3,000 propiedades y cubrió cientos de hectáreas de tierras de cultivo con lava. Unas 7,000 personas debieron ser evacuadas. La actividad duró alrededor de tres meses.

Capítulo III - *Procesos de remoción de masa*

Los fenómenos de movilización o remoción de masa son designados con varios nombres que dependen de sus características, algunos de las cuales indican el origen del proceso. Todos ellos son causados por la fuerza de gravedad, pero otros factores condicionan su ocurrencia. Hasta hace poco eran designados colectivamente como derrumbes, pero los estudios modernos más detallados de su dinámica han favorecido el que sean llamados colectivamente como movimientos o remoción de masa, para reservar otros nombres para procesos particulares. Se habla así, además de derrumbes, de deslizamientos, desprendimientos, flujos de lodo o escombros, avalanchas o aludes, sumideros y sinónimos de estos términos. Existen varios mecanismos por los que ocurren estos movimientos y aunque sus efectos no son tan pronunciados como los de un temblor o una erupción volcánica, ocurren con mayor frecuencia y en más sitios. Por otra parte, muchos de ellos están también asociados a terremotos o volcanes.

Tipos de procesos de remoción de masa

Los procesos de movimiento de masa pueden clasificarse de acuerdo con las causas que ocasionan la movilización de grandes masas de material de muy diversa naturaleza. **Figura 3.1** muestra estos tipos de manera general.

Algunos derrumbes pueden ser complejos y abarcar varios de los tipos ilustrados en la **figura 3.1**.

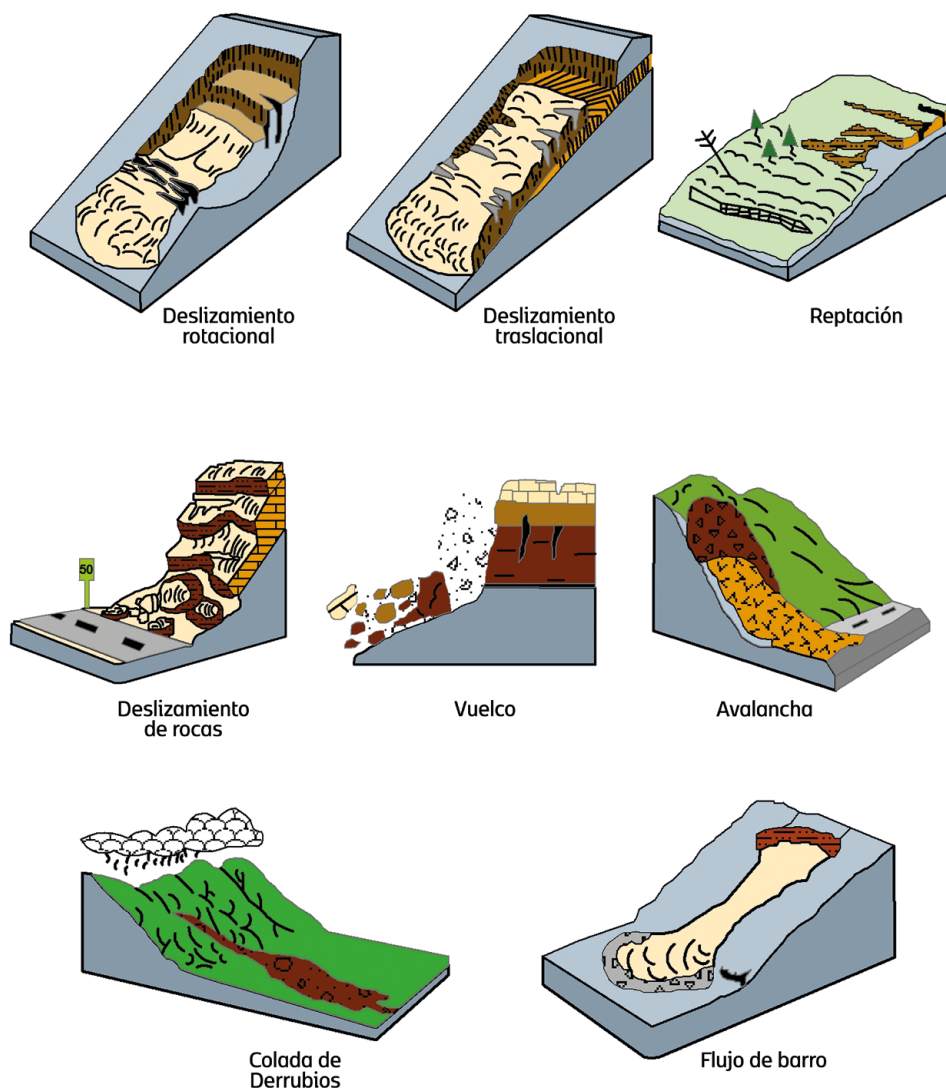


Fig. 3.1 Diferentes tipos de derrumbes.

Todos los derrumbes son debidos al fracturamiento de materiales (rocas, suelo) cuando son sujetos a la acción de fuerzas de varios tipos, o a la pérdida de cohesión (esto es, de unión entre las partículas que forman el material) por el efecto de diversos fenómenos. Entre las causas externas más importantes de fracturamiento o pérdida de cohesión se encuentran:

1. La pérdida de apoyo lateral a causa de la remoción de material por erosión de ríos, arroyos, lagos y mares o por construcción de caminos, excavación de canteras, canales, filtración al subsuelo en redes de distribución de agua potable o de desagüe de aguas negras. En algunas ocasiones la pérdida se debe a la circulación de aguas subterráneas cuando se ha construido sobre antiguos lechos de ríos o acuíferos naturales.
2. Vibración del terreno por temblores, explosiones, tráfico vehicular entre otras.
3. Aumento de la carga que soporta el terreno. Esta puede ser debida a construcciones, nieve, agua, acumulación de detritos de varios tipos, como desperdicios, productos volcánicos, o desechos minerales.

Por otra parte, los factores que contribuyen a la pérdida interna de cohesión en los materiales incluyen, entre otros:

1. Cambios debidos al intemperismo o a reacciones químicas en los componentes del material. En efecto, el sol, el agua y el viento sujetan a los materiales de la superficie terrestre a cambios muy abruptos en temperatura, los cuales, a su vez, producen fracturamiento u otros cambios en la textura y resistencia de los materiales. El agua de la lluvia (o de la nieve) puede disolver algunos materiales o llevar en solución algunas sustancias que reaccionen químicamente con los componentes del material en cuestión.
2. Cambios en el contenido de agua y en la estructura interna del material, por ejemplo, aumento en el número de microfracturas, del número de poros o de la interconexión entre los mismos, etcétera. El cambio en el contenido de agua es de gran importancia, sobre todo en el caso de materiales sueltos o inconsolidados como los suelos, la arena, y los detritos o escombros de diverso tipo puesto que, como veremos, su conducta mecánica, es decir, la facilidad que tienen para desplazarse bajo la acción de ciertas fuerzas, depende de su contenido de agua.

3. Las características propias del material, tales como textura, composición y estructura, así como la geometría de su emplazamiento. Por textura del material se entiende la forma en que están dispuestos entre sí los elementos que lo forman: en el caso de las rocas, los distintos granos de minerales.

Los daños ocasionados por movimientos de masa alcanzan grandes cifras en costo humano y económico, y en algunas ocasiones causan pérdidas comparables a las debidas a terremotos. Uno de los mayores desastres fue causado por el efecto conjunto de una avalancha de nieve y un derrumbe de rocas el 31 de mayo de 1970 en las regiones montañosas del Perú. En aquella ocasión, un temblor provocó una avalancha de nieve de la cima del pico Huascarán, a 6,654 m.s.n.m. La caída de la nieve arrastró miles de toneladas de rocas cuesta abajo y junto con ellas se precipitó hacia una cuenca más profunda con cuyo glaciar se mezcló, provocando un gigantesco flujo de escombros. La mezcla se desplazó a través de la cuenca con velocidades superiores a los 300 km por hora y se coló a través de la garganta que cerraba la cuenca. En su camino arrastró otros materiales y como un monstruoso flujo de lodo se dirigió por la cuenca del río Shacsha hacia las poblaciones de Ranrahirca y Yungay, cubriéndolas casi en su totalidad. Los bloques de roca más grandes alcanzaron hasta 15 metros cúbicos en volumen, de manera que el efecto del flujo fue devastador. En total, más de 25,000 personas perdieron la vida. En Yungay, la única zona segura resultó ser una pequeña colina donde se asentaba el cementerio local y en la que 92 personas salvaron sus vidas. La velocidad del flujo fue tan grande que alcanzó Yungay en unos pocos minutos y tomó a sus habitantes por sorpresa. En sólo unos pocos minutos, Yungay y Ranrahirca habían desaparecido del mapa ([figura 3.2](#)).

El suceso de Yungay está conectado con el temblor del mismo día. Probablemente éste impuso un esfuerzo adicional a la ya sobrecargada cima del Huascarán, provocando su colapso. Fue a su vez esta caída la que impuso una carga adicional a las masas de rocas, que podrían a su vez haber perdido resistencia y ceder ante el peso.

Otro desastre de consecuencias inusitadas y que muestra el efecto del flujo de materiales por aumento del contenido de agua fue el acaecido el 21 de octubre de 1966 en la pequeña ciudad minera de Aberfan, en Gales del Sur. Este poblado se encuentra al pie de una colina en cuya cima se acumulaban los sobrantes de una mina de carbón cercana. Ante las abundantes lluvias precedentes al desastre, el contenido de agua en el desecho aumentó, al punto de hacerlo perder toda cohesión y fluir ladera abajo, arrastrando un grupo de casas y la escuela local, donde en esos momentos se encontraban 116 niños. El flujo tuvo una longitud de 800 m y

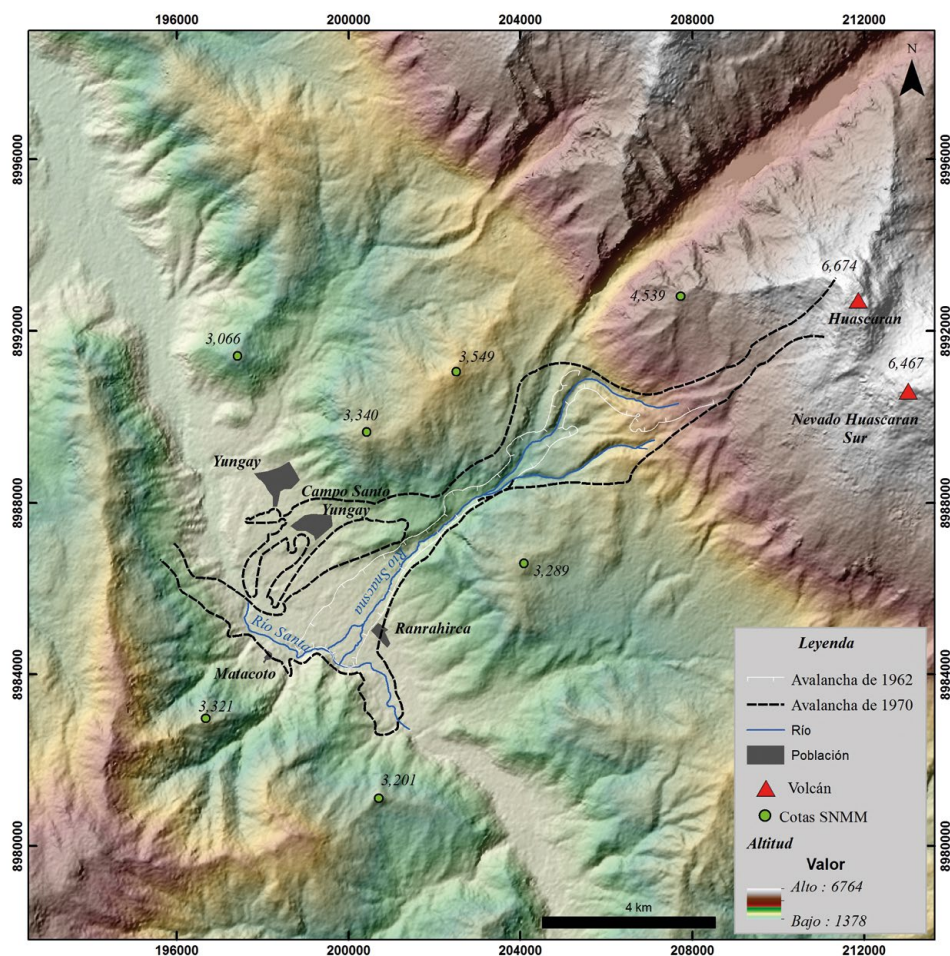


Fig. 3.2 Mapa de avalanchas de Huascarán, de 1962 y 1970. (Tomado de Whittow, 1980)

pericieron en total 144 habitantes del lugar. Investigaciones posteriores revelaron que los desperdicios habían sido depositados durante 30 años, obstruyendo líneas de drenaje subterráneo y percolación natural, de manera que la base del depósito se encontraba saturada de agua. Cuando el material sólido del resto del depósito se colapsó, la base se licuó al aumentar la presión de poro y actuó como un fluido, arrastrando todo el material que ocasionó la desgracia.

Un caso similar ocurrió en México el 27 de mayo de 1937 a las 5:20 de la mañana en el pueblo minero de Talpujahuá en el estado de Michoacán, cerca de su límite con el estado de México, donde después de varios días de intensas lluvias se colapsó el retén de la presa donde se vertían los llamados jales, o materiales de ganga, de la cercana mina de oro y plata las dos Estrellas. Colapsado el retén, se

formó una corriente de lodo y escombros, contaminados con el cianuro utilizado para la separación de los metales valiosos, que descendió por los cauces de los arroyos Dos Estrellas y el Carmen a una velocidad de unos 70 km/hr y en unos 20 minutos inundó Tlalpujahua y el cercano poblado de Venta de Bravo. La inundación arrasó personas y animales y destruyó casas, postes eléctricos y su cableado provocando explosiones y otros daños; al menos 300 personas perdieron la vida. La iglesia del Carmen, una gran y resistente estructura, quedó cubierta en gran medida por aquella mezcla contaminada y solo su torre quedó en la superficie, misma que aún permanece erecta recordando la tragedia.

Es importante profundizar un poco más en el tema, por ser este mecanismo de acción el que produce los derrumbes por flujo. Los materiales no consolidados, es decir, no compactados, como la arena, pueden mantener cierto relieve por efecto de la fricción entre los granos. Así, si colocamos un puñado de arena sobre una superficie plana y procuramos alcanzar la máxima altura, nos daremos cuenta de que podemos formar un cono con pendientes de aproximadamente 30 grados. En esta configuración tenemos un equilibrio entre las fuerzas de gravedad y las fuerzas de fricción entre partículas. La fuerza de fricción existe porque los granos se tocan uno a otro (figura 3.3 [a]). Si el material contiene un poco de agua, las fuerzas de tensión superficial aumentan la resistencia al movimiento: todos sabemos que se pueden hacer castillos de arena húmeda y no seca. Si además las partículas son muy finas, existen fuerzas electrostáticas importantes que las mantienen unidas. Sin embargo, si el contenido de agua aumenta o si ésta fluye entre las partículas, el contacto entre las puntas de las partículas se elimina y la resistencia disminuye abruptamente. Si existen fuerzas actuando sobre el conjunto, tales como la gravedad,

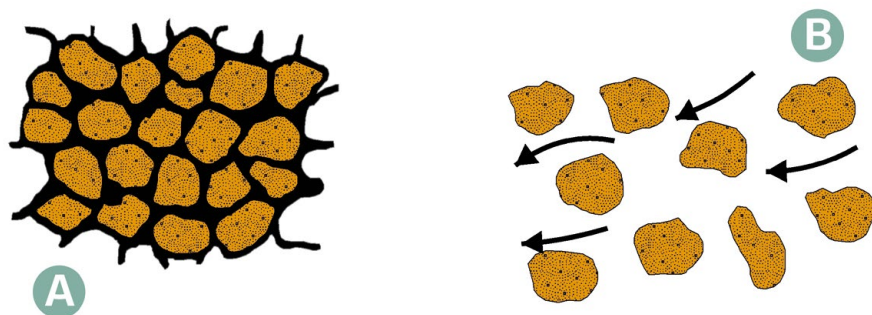


Fig. 3.3 La dinámica del movimiento de materiales terrestres no consolidados depende en gran medida de su contenido de agua. En (a) las fuerzas de fricción entre granos controlan el movimiento; en (b) las fuerzas desaparecen y el movimiento es controlado por las fuerzas viscosas del líquido.

se produce el flujo del material (figura 3.3 [b]). En general, las fuerzas de fricción entre los puntos en contacto de partículas vecinas pueden variar con la posición en un depósito, puesto que las partículas más bajas soportan el peso de las superiores. Al mismo tiempo, el agua tiende a percolarse hacia las partes inferiores, con lo cual el comportamiento de tales depósitos puede resultar inesperadamente inestable.

La licuefacción del material, es decir, su pérdida de cohesión y comportamiento semejante al de un fluido, también puede presentarse por vibraciones debidas a temblores o a otros muchos factores naturales o humanos. El efecto de las vibraciones es, nuevamente, el lograr la separación entre las partículas y con esto disminuir su resistencia a los esfuerzos.

El desastre de la presa de Vaiont, ocurrido en 1963 en los Alpes italianos, ilustra las consecuencias de un deslizamiento de rocas. La presa de Vaiont fue construida en un cañón en que los estratos de sus laderas tenían una inclinación paralela a las pendientes de las mismas. El 9 de octubre, un deslizamiento de rocas, con un volumen estimado de 260 metros cúbicos, se precipitó hacia las aguas de la presa, creando una ola de unos 100 m de alto, que sobrepasó la presa y se precipitó valle abajo, matando a unas 2,000 personas de los poblados vecinos (figura 3.4).

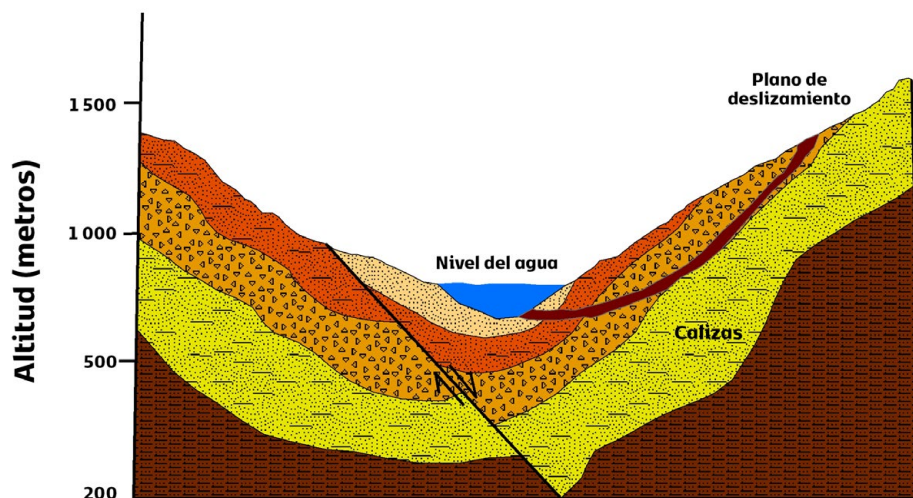


Fig. 3.4 Esquema de la presa de Vaiont que produjo la catástrofe de 1963. (Tomado de Whittow, 1980).

En México, el 16 de octubre de 1955, a las 10:45 horas, después de tres días de intensas lluvias un devastador flujo de escombros volcánicos en las laderas orientales del volcán Nevado de Colima descendió por los cauces de tres arroyos que confluyen en una quebrada cercana al poblado de Atenquique, Jalisco. En su camino aguas

abajo engulló un depósito de agua que contribuyó significativamente a aumentar el volumen del flujo, que además continuó aumentando progresivamente con el aporte de escombros y alcanzó el pueblo de Atenquique con una altura de más de 8 m, causando la muerte de más de 23 personas, y provocando la destrucción parcial de la ciudad. Adicionalmente causó grandes daños a las instalaciones de la fábrica de papel “Compañía Industrial de Atenquique”, fuente importante de empleo para el poblado. Como en el caso de Tlalpujahua, de la iglesia destruida solo permaneció la estructura de su torre que los pobladores aún conservan como recuerdo de aquel evento.

Lamentablemente tanto en México como en otras partes del mundo se producen anualmente daños en caminos y vías de comunicación, así como pérdidas de vidas humanas por efecto de las remociones de masa. Algunas zonas del área metropolitana de la Ciudad de México sufren frecuentemente derrumbes como resultado de la temporada de lluvias. En 1987, alrededor de 30 personas perecieron por esta razón. Así pues, los procesos de remoción de masa constituyen un desastre natural que es necesario prever con el objeto de minimizar sus efectos.

Predicción y mitigación de los derrumbes

En los ejemplos mencionados, el desastre había dado amplias señales de su posible ocurrencia. En el caso de Yungay puede decirse que ya en 1962 la cercana ciudad de Ranrahirca había estado a punto de desaparecer en medio de un flujo de lodo en el que perecieron unas 4,000 personas. El desastre de Aberfan había dado también señales de peligro, pues la cima del apilamiento de detritos se había movido anteriormente y un exdirector de la escuela había llamado la atención sobre el peligro. Igualmente, en la presa de Vaiont, la inestabilidad de las rocas era conocida por su geometría, por derrumbes anteriores y por la existencia de fracturas perpendiculares a los estratos en las laderas del cañón y en la debilidad en la presa de Tlalpujahua había sido advertida y anunciada antes de su colapso. Aun cuando no existan señales claras de peligro, estudios geológicos y de ingeniería civil permiten la evaluación del riesgo en aquellos sitios en que el mero relieve topográfico indica la posibilidad de un desastre. Los estudios actuales incluyen una gran variedad de métodos. Entre éstos cabe mencionar los siguientes:

1. Estudios geológicos e hidrológicos para determinar el carácter y disposición de las rocas y suelo, el patrón de fracturas y el del flujo del agua subterránea, así como el patrón de drenaje superficial y las pendientes críticas.
2. Estudios de laboratorio para determinar el comportamiento de rocas y suelo.

3. Estudios geofísicos y geodésicos para valorar las condiciones subterráneas y estudiar las deformaciones existentes en el terreno.

Con la evaluación así obtenida, es responsabilidad de las autoridades el tomar medidas correctivas como la construcción de terrazas, modificación del drenaje superficial o subterráneo, la reforestación de pendientes o la construcción de estructuras para la modificación de la trayectoria del derrumbe. En algunos sitios se han presentado deslizamientos del terreno a causa de la deforestación en taludes. Asimismo, deben tomarse medidas preventivas entre las que deben destacarse la elaboración de mapas de riesgo y ordenanzas para el uso del terreno y en algunos casos, el monitoreo continuo y la creación de un sistema de alarma.

Colapso o hundimiento del terreno

El colapso o hundimiento del terreno es otro de los fenómenos geológicos cuya ocurrencia, a pesar de ser poco espectacular, ocasiona innumerables daños y pérdidas económicas. Estas son aún mayores cuando ocurren en ciudades densamente pobladas o en aquellas con edificios de gran valor artístico o histórico. Las causas del hundimiento del terreno son generalmente (sin tomar en cuenta las debidas a causas tectónicas como los terremotos) de varios tipos:

1. Por pérdida de soporte debido a la remoción de material del subsuelo.
2. Por extracción de fluidos.
3. Por extracción o erosión interna de materiales sólidos.
4. Por sobrepeso.

El primer tipo de proceso conlleva la disolución de materiales solubles. Por ejemplo, las calizas son muy solubles en agua. Cuando el agua subterránea se percola a través de las mismas, se producen cavernas y cavidades que pueden colapsarse por el peso sobreyacente. Los terrenos de este tipo son llamados kársticos. La península de Yucatán presenta suelos de este tipo, pero también los hay en los estados de Campeche, Chiapas y Nayarit.

En otras ocasiones las causas de formación de grandes pozos o sumideros ocurren en zonas urbanas por factores no solo naturales sino antrópicos, como en el caso de un gran sumidero formado en la Ciudad de Guatemala el 30 de mayo de 2010. El sumidero comprendió un área de aproximadamente 20 m de diámetro y 90 m de profundidad en el norte de esa ciudad, engullendo una fábrica de tres pisos. El sumidero se produjo por una combinación de razones; en primer lugar, las construcciones se habían asentado en depósitos volcánicos de ceniza y pómez,

materiales poco consolidados y de baja densidad, lo que facilitó su erosión cuando se rompieron las tuberías de drenaje. Estas últimas estaban congestionadas por las cenizas esparcidas por una erupción del cercano volcán Pacaya y las lluvias de la tormenta Agatha, ambos fenómenos ocurridos unos días antes.

Sumideros en terrenos no kársticos, aunque afortunadamente no de las mismas proporciones, ocurren a menudo en otras partes del mundo. Uno de ellos se produjo en un campo de cultivo en los alrededores de Santa María Zanatepec en el estado de Puebla, donde el 29 de mayo de 2021 un sumidero de unos 5 m creció en unas pocas horas hasta abarcar una superficie circular con unos 60m de diámetro y 20 m de profundidad. Se piensa que la causa probable de la formación de este sumidero, además del tipo de material en el subsuelo, fue la extracción de agua, lo que nos lleva al siguiente punto.

La extracción de fluidos del subsuelo es una de las causas más extendidas de hundimiento. Ciudades tales como México, Copenhague, Ravena y los valles de Santa Clara y San Joaquín, en California, han sufrido daños por el hundimiento a causa de la extracción de agua. En los tres primeros casos, importantes edificios históricos han tenido que ser apuntalados a gran costo y muchos otros se encuentran en peligro.

Entre los fluidos que con mayor frecuencia se extraen se encuentran en primer lugar el agua y en segundo lugar el petróleo y el gas natural. En la Ciudad de México, la extracción de agua causó subsidencias de hasta 8 m en el período de 1938 a 1968, cuando la razón anual de hundimiento llegó a ser hasta de 30 cm por año. Después de la reglamentación en la extracción del agua, la razón anual ha sido de unos 3 cm por año. En Ravena, Italia, el hundimiento, que ha llegado a ser de 10 cm por año, no sólo es debido a la extracción de agua sino también a la de gas natural.

La razón por la que la extracción de fluidos puede causar hundimientos es la siguiente: el subsuelo puede clasificarse con respecto a su contenido de agua en dos grandes zonas. En la más superficial, y que llamaremos zona insaturada, el agua no llena completamente los vacíos y poros del subsuelo. En la zona más baja el agua llena completamente todos los poros y vacíos y constituye, por esto, la zona saturada. El nivel freático es la superficie que nos señala el comienzo de la zona de saturación.

En la región saturada, bajo el nivel freático, la presión del agua en los poros equilibra, junto con la rigidez del terreno, el peso del material sobreyacente. Cuando se extrae agua a una velocidad mayor que la de recarga del acuífero, desciende el nivel freático y por ende se altera el equilibrio de fuerzas, con lo cual el terreno cede ante el peso y ocurre el hundimiento. El efecto de la extracción de aguas es particularmente notable en las ciudades, pues su cubierta de asfalto y concreto evita la percolación del agua y por lo tanto la recarga de los acuíferos.

La mitigación de los daños por hundimiento se dirige a evitar el descenso del nivel freático, generalmente regulando la extracción de aguas en los acuíferos explotados. Por otra parte, la introducción de métodos de cimentación adecuados es imperativa. Un ejemplo de esto último lo constituye la Torre Latinoamericana en la Ciudad de México que, a pocos metros del Palacio de Bellas Artes, permanece incólume muy cerca de donde este último edificio ha sufrido un hundimiento notable que le ha causado daños severos.

Aún sin la extracción de agua, la construcción de un edificio impone una sobrecarga al terreno, cuya resistencia podría bien ser insuficiente. Casos de este tipo son actualmente raros, pues los avances en la disciplina conocida como mecánica de suelos permiten al ingeniero civil hacer predicciones bastante adecuadas sobre la conducta del suelo. Sin embargo, este efecto fue frecuente en el pasado; quizá el mejor ejemplo lo constituye la famosa torre inclinada de Pisa, que fue construida sobre una mezcla de arcillas y arenas, por lo que se produjo un asentamiento dispar que le da a la torre una separación de la vertical de más de cuatro metros.

Finalmente podemos considerar los colapsos del terreno por extracción de materiales sólidos. El minado de varios tipos de depósitos, incluyendo arena y grava, cuando no se lleva a cabo sustentando adecuadamente las galerías creadas, puede tener graves consecuencias, como sucedió el 21 de enero de 1960 en Coalbrook, Sudáfrica, donde el colapso de las galerías de una mina de carbón causó la muerte a 437 mineros y el asentamiento de 3 km cuadrados de ese poblado a profundidades de hasta 143 m.

Graves riesgos representan también las galerías de minas de arena abandonadas y cuya ubicación se ignora. Algunos fraccionamientos aledaños a la Ciudad de México se ubican sobre zonas de este tipo. No pocas vidas se han perdido de esta manera y los daños a la propiedad resultan igualmente graves.

Como hemos dicho, existe una variedad de métodos geofísicos para detectar estas galerías y es responsabilidad de las autoridades el pedir a los constructores estudios de este tipo antes de emprender la construcción o urbanización en dichos terrenos. Entre estos métodos podemos citar brevemente el método gravimétrico, el sísmico y el eléctrico.

El método gravimétrico consiste en medir el valor de la gravedad por medio de instrumentos muy sensibles, llamados gravímetros. Como es sabido, la fuerza de gravedad es debida a la atracción de la Tierra; sin embargo, esta fuerza no es constante en todo el planeta, sino que presenta pequeñas variaciones que dependen de la latitud a que se encuentra un punto dado, de la altura sobre el nivel del mar, de la topografía que lo rodea y de las diferentes masas de rocas (o carencia de ellas) que yacen en el subsuelo. Las diferencias en gravedad debidas

a estos factores son, desde luego, minúsculas y sólo pueden ser detectadas con los instrumentos mencionados. Es posible separar las contribuciones de los diferentes factores al valor de la gravedad y analizar sólo aquellas debidas al último factor mencionado; de esta manera, se puede inferir la estructura de las rocas del subsuelo o la existencia de una mina o caverna.

El método sísmico, a su vez, se basa en el análisis de las ondas sísmicas generadas por una perturbación producida artificialmente, tal como una explosión, o un golpe sobre el terreno. Existen dos métodos de exploración sísmica: el método de reflexión y el método de refracción. El primer método consiste en recoger, por medio de sensores conocidos como geófonos, la señal reflejada por los diferentes materiales del subsuelo. En este caso, las ondas sísmicas actúan como los rayos luminosos que al reflejarse en los objetos nos permiten verlos. La información así proporcionada es de gran calidad y nitidez; sin embargo, resulta de un alto costo. En los últimos años es principalmente la industria petrolera la que utiliza ampliamente este método. Por su parte, en el método de refracción se utilizan las ondas críticamente refractadas y se infiere la estructura que las causa a través del análisis del tiempo de llegada de dichas ondas. Para comprender mejor estos métodos, consideremos un rayo luminoso que incide en un medio en donde la velocidad de la luz es diferente (figura 3.5). El rayo se apartará de la perpendicular a la superficie de separación si la velocidad de la luz es mayor en este medio y se acercará si es menor. Si suponemos que ésta es mayor, entonces, al aumentar el ángulo de incidencia, el rayo se acercará a la superficie de separación y existe un ángulo para el cual el rayo “críticamente refractado” se genera a lo largo de la frontera entre ambos medios con la velocidad del medio inferior. Este mismo efecto ocurre con las ondas sísmicas. Si se colocan

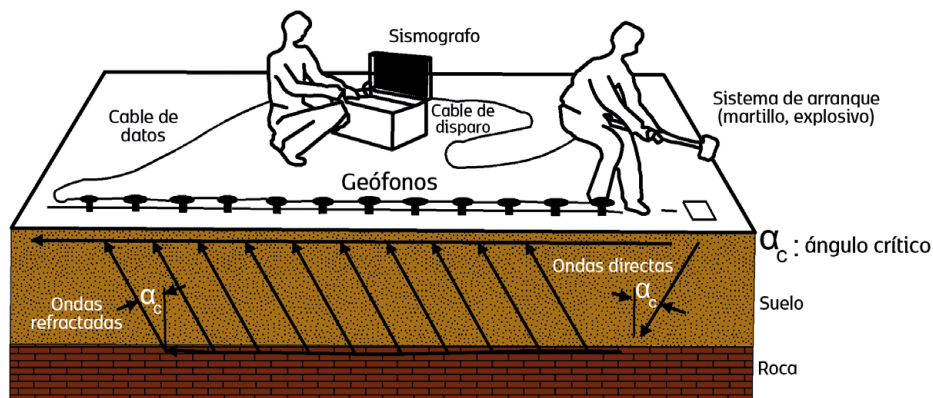


Fig. 3.5 Esquema ilustrativo del método de refracción.

detectores en la superficie, tales ondas pueden ser registradas, pues, de acuerdo con un principio de la física, cada punto del frente de una onda actúa como un nuevo emisor de ondas, de manera que en la representación de la **figura 3.5**, los rayos que salen de la frontera entre los medios corresponden a aquellas ondas que han viajado a través de esta última y luego se dirigen a los receptores con la velocidad del medio 1. Los geofísicos analizan los datos así recabados y pueden inferir, en términos del tiempo que tardan en llegar las diferentes ondas, la estructura interna de un área dada.

Otro método geofísico que tiene amplia aplicación en la determinación de la estructura del subsuelo es el conocido como de resistividad. Este consiste esencialmente en la introducción de una corriente eléctrica en el subsuelo por medio de un par de electrodos y la determinación de la resistencia que ofrece al paso de la misma; esto último se logra por medio de otro par de electrodos conectados a un voltímetro. En general, la metodología empleada requiere de una serie de medidas y existe una amplia gama de maneras de colocar los diferentes electrodos. Como la resistencia del subsuelo al paso de la corriente depende tanto del material como de su disposición, los geofísicos pueden inferir estos últimos a partir de los datos obtenidos en esta forma.

Muy a menudo, las interpretaciones geofísicas presentan cierto grado de ambigüedad. En estos casos, el empleo de varios métodos la reduce en gran manera y pueden obtenerse resultados satisfactorios y poco costosos.

Apendice III

Movimientos de masa históricos destructivos

Lugar	Año	Muertes	Comentarios
Huaraz, Perú	1941	7,000	Avalancha de nieve y flujo de lodo.
Santos, Brasil	1956	más de 100	Derrumbes.
Cañón Madison, E.U.A	1959	26	Disparado por un sismo.
Huascarán, Perú	1962	4,000	Avalancha y flujo de lodo.
Presa Vaiont, Italia	1963	2,000	Derrumbe en la presa.
Río de Janeiro, Brasil	1966	279	Derrumbe.
Hong Kong	1966	64	Flujo de terreno.
Aberfan, Gales del Sur	1966	144	Flujo de detritos.
Huascarán, Perú	1970	25,000	Avalancha, derrumbe, flujo de detritos.
Mayunmarca, Perú	1974	450	Derrumbe de rocas, flujo de detritos.
Estado Vargas, Venezuela	1999	1,500 a 3,000 muertos	Avalancha de escombros a causa de intensas lluvias.

Capítulo IV - Inundaciones

Aunque los desastres por inundaciones dependen principalmente de los fenómenos meteorológicos, parte de su origen puede encontrarse en las características físicas y geológicas del terreno y por este motivo son tratados en este capítulo. Las inundaciones son unas de las catástrofes más frecuentes y recurrentes en el mundo y en nuestro país, y su consideración en los trabajos de prevención de desastres es de primordial importancia.

Esencialmente, las inundaciones son causadas por fluctuaciones del ciclo hidrológico que ocasionan precipitaciones con volúmenes superiores a los que pueden ser desalojados por un sistema dado de drenaje. En las zonas costeras puede ocurrir otro tipo de inundaciones cuando se presentan elevaciones anómalas del nivel del mar a causa de tormentas, ciclones o tsunamis; sin embargo, aquí nos referiremos sólo al primer tipo.

El agua que proviene de la precipitación atmosférica es conducida al océano por una serie intrincada de arroyos, ríos, lagos y presas que constituyen la red de drenaje o red fluvial. La cantidad de agua captada por la red y la rapidez con que aquélla es desalojada depende de factores geológicos y fisiográficos como son la topografía (y en especial la pendiente de las laderas), el tipo de suelo y subsuelo, la cubierta vegetal y el patrón de la red de drenaje. Veamos esto con un poco más de detalle.

Del agua que se precipita en un área dada, sólo aquella fracción que corre en la superficie es captada por la red; otras fracciones son absorbidas por el subsuelo, en donde continúan el ciclo hidrológico como aguas subterráneas o son transportadas a la atmósfera por evaporación directa en la superficie del suelo o en las hojas de las plantas, que a su vez la toman del suelo y el subsuelo (figura 4.1).

Es por esta razón que tanto la pendiente de las laderas como el tipo de suelo y subsuelo, así como la cubierta vegetal, determinan la cantidad de agua corriente (o como se conoce en términos geohidrológicos, el escurrimiento) que sigue a una lluvia. En efecto, en las laderas escarpadas en suelos desprovistos de vegetación y poco absorbentes se producen escurrimientos muy intensos. En las zonas áridas y semiáridas, donde la precipitación es escasa, pueden presentarse crecimientos muy rápidos en los lechos de los arroyos durante las pocas ocasiones en que hay precipitación debido a la situación descrita. Por otra parte, en áreas de mucha vegetación, laderas suaves y suelos absorbentes, el escurrimiento es mínimo. Ahora bien, dado un volumen de escurrimiento, su desalojo hacia el océano lo lleva a cabo la red fluvial, que está formada por los arroyos y los ríos y que puede además

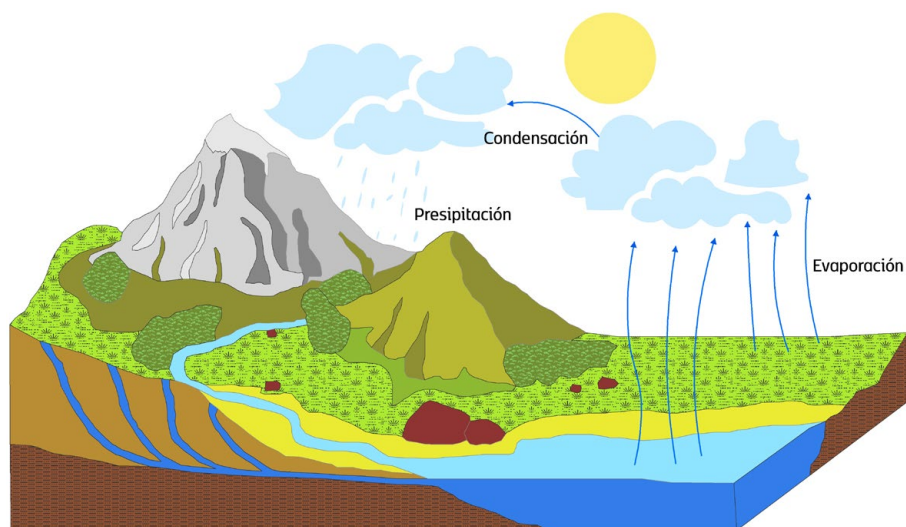


Fig. 4.1 El ciclo hidrológico.

contener reservorios tales como lagos y presas. La forma en que están unidos estos elementos es lo que se conoce como patrón de drenaje, patrón de la red fluvial o simplemente patrón fluvial.

Todos estos factores determinan los aspectos principales de la peligrosidad de una inundación: el volumen de agua y la velocidad con que fluye. Este último aspecto es de gran importancia, puesto que la velocidad del fluido determina la proporción de sólidos que puede arrastrar.

Es conveniente detallar nuevamente el papel de estos factores: la inclinación de las pendientes es determinante en la velocidad del escurrimiento hacia los ríos. Dada la naturaleza del terreno, una pendiente abrupta incrementa la velocidad del escurrimiento, mientras que una ladera suave cede el fluido a menor velocidad, lo cual prolonga la entrega del caudal e incrementa la percolación. Por otro lado, el flujo tendrá mayor o menor capacidad de erosionar y acarrear materiales de acuerdo con su velocidad. El tipo de suelo es determinante en el volumen de escurrimiento, puesto que éste controla la cantidad de agua que es absorbida y percolada al subsuelo. Los suelos arenosos permiten una rápida percolación, mientras que en los suelos arcillosos es muy lenta. Asimismo, el tipo de roca del basamento es de gran importancia, puesto que de ella depende la posterior acumulación del agua percolada. Finalmente, la cubierta vegetal incrementa la evaporación del agua porque absorbe agua del suelo y del subsuelo, acrecienta la superficie efectiva de evaporación, modifica el suelo y el subsuelo, aumentando su capacidad de comunicación y retención de agua, disminuye la velocidad de escurrimiento, y facilita la percolación.

Los factores anteriores, junto con otros de tipo geológico como son la composición y textura de las rocas, así como su fracturamiento y posible fallamiento, determinan el patrón de drenaje. Estas características geológicas son muy importantes porque determinan las líneas de debilidad de una roca y por ende los cursos que por erosión seguirá el agua. Como un ejemplo de la importancia del patrón de drenaje en la circulación del agua, considérese la **figura 4.2** que ilustra dos tipos de red. En la primera, el agua de las corrientes tributarias alcanza el cauce principal en forma sucesiva, de manera que el volumen de agua se incrementa en forma gradual y se mantiene por cierto tiempo en sus niveles más altos. En la segunda red, el escurrimiento alcanza el tronco principal simultáneamente y produce un aumento rápido del volumen, pero de menor duración. De esta manera, dado un volumen de agua de escurrimiento, su evacuación será determinada por el patrón de drenaje. Por otra parte, elementos tales como lagos y presas contribuyen a la captación de aguas y por lo tanto a la estabilidad del sistema hidrológico; también contribuyen a este objeto ciertas áreas encontradas en algunos márgenes de los ríos y que son conocidas como llanuras de desbordamiento. Estas permiten la distribución del exceso de agua; de hecho, se forman luego de sucesivas inundaciones.

Una vez aclarados los puntos anteriores, podemos considerar los efectos destructivos de las inundaciones. Con la multiplicación de las zonas pobladas, el hombre compete con la naturaleza por el uso del terreno. Cuando esta competencia se lleva a cabo sin considerar las consecuencias de las transformaciones que el uso de este último induce en el ciclo hidrológico, la función natural del terreno o las anomalías, pero no improbables, fluctuaciones en la precipitación, se producen catástrofes cuyos costos, tanto en vidas humanas como económicos, pueden ser muy altos.

Como un ejemplo, consideremos la muy conocida y lamentada inundación de 1966 en la región Toscana, en Italia. Aquel año, la región recibió en solamente 24 horas, un tercio de su promedio anual. Como consecuencia de esto, el río Arno se desbordó e inundó el área segando la vida de 127 personas, dejando sin hogar a más de 12,000 familias, y ocasionando innumerables daños en puentes y caminos. Sin embargo, el hecho que más atrajo la atención mundial fue la inundación de la cercana ciudad de Florencia, una de las ciudades más importantes de la cultura occidental, donde la profundidad de las aguas llegó a alcanzar hasta cinco metros. En las calles, las velocidades del fluido alcanzaron más de 100 km/hora, destruyendo cerca de 10,000 vehículos e inundando los edificios públicos y cerca de 5,000 casas. Tanto los servicios públicos (electricidad, agua, teléfono), como las instalaciones industriales, resultaron severamente averiados. En los depósitos de estas últimas, grandes cantidades de petróleo se mezclaron con las aguas, haciéndolas más repugnantes y destructivas. Cientos de obras de arte, libros, esculturas, edificios, puertas antiguas, etcétera, que-

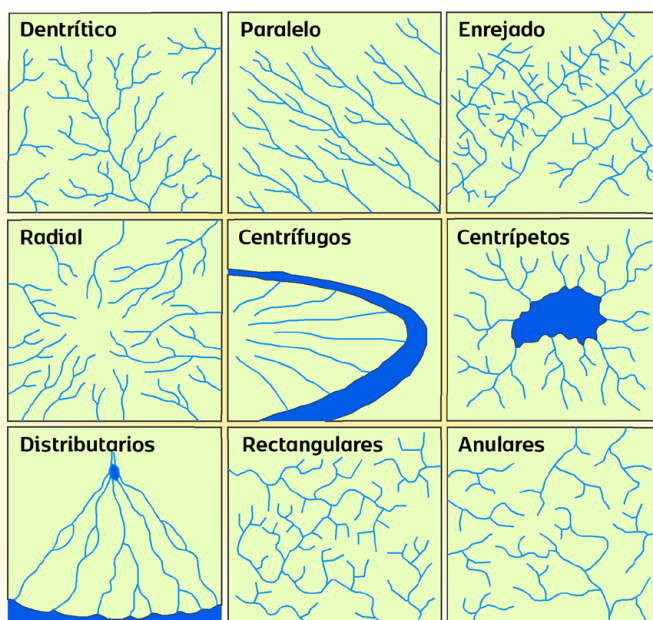


Fig. 4.2 Dos tipos de patrones de drenaje.

daron irreparablemente dañados. Además del daño humano y las pérdidas artísticas, el económico fue enorme; los costos de reconstrucción de la ciudad fueron de más de 700 millones de dólares de esos años.

Por su parte, México es un país con frecuente ocurrencia de inundaciones. La misma Ciudad de México ha sufrido innumerables inundaciones desde la época colonial. Cuando los antiguos mexicanos fundaron Tenochtitlan en el siglo XIV, conocedores por experiencia de las posibilidades de inundación, por su ubicación en medio del lago de Texcoco, construyeron diques y muros de piedra para controlar el nivel de las aguas. Luego de la conquista por los españoles estas barreras fueron derribadas y la ciudad quedó a merced de las aguas del lago de Texcoco. En 1607 el virrey Luis de Velazco inició el desagüe de los lagos del valle, obra llevada a cabo por Enrico Martinez. A pesar de esto, en 1629, la ciudad experimentó la que sería su más grande inundación. Ese año la lluvia duró 36 horas provocando que la ciudad quedara casi completamente cubierta por las aguas, y sumergida bajo estas durante cinco años, al punto que solo se podía circular por sus calles en canoa. La inundación causó miles de muertes y tantas dificultades que incluso se consideró la posibilidad de mover la capital a otra parte del país, hecho que nunca se realizó, por lo que a lo largo de la historia se presentaron un buen número de inundaciones de diversa magnitud, así como diversos planes para construir el desagüe de la ciudad.

Durante el Porfiriato se construyó el Gran Canal como eje del sistema de desagüe que controlaría las aguas del valle y, aunque se han realizado numerosas obras complementarias desde entonces se siguen presentando inundaciones en diversos sitios de la ciudad si bien no de las dimensiones de antaño.

Además de nuestra capital, virtualmente en todo el territorio nacional ocurre con mayor o menor frecuencia inundaciones de algún tipo. Las zonas más afectadas son las costeras, por estar en la trayectoria que siguen a menudo los ciclones del Pacífico y del Caribe. La ciudad de Monterrey, Nuevo León, para dar un ejemplo bien conocido, ha vivido tremendas y destructivas inundaciones desde la época colonial; se pueden citar las de 1611, 1636, 1909, 1938, 1967, 1988 y 2010. Todas ellas han causado daños de diversa magnitud que han causado muertes e inmensas pérdidas económicas.

Previsión y mitigación de los efectos de las inundaciones

En el estudio de este fenómeno natural es necesaria, como hemos visto, la contribución de varias disciplinas tales como la meteorología, la ingeniería hidráulica y la geología. Así, la previsión de los desastres causados por las inundaciones es multidisciplinaria. Sin embargo, puede señalarse que las medidas encaminadas a mitigar los daños que causan incluyen varios aspectos, entre los cuales cabe destacar los siguientes:

I.- Para disminuir la vulnerabilidad de un sitio:

1. Identificación de las áreas de riesgo y planeación del uso del terreno.
En este sentido cabe hacer notar que la identificación de las áreas de riesgo es de primordial importancia para la planeación del crecimiento de las zonas pobladas. La determinación de estas áreas no es difícil, pues puede hacerse a través de estudios geológicos e hidrológicos relativamente poco costosos; sin embargo, ocurre muy a menudo que una misma población sufra continuamente los efectos destructivos de las inundaciones. Resulta innecesario decir que la falta de previsión es muchas veces la causa de no pocos desastres.
2. Legislación sobre el uso del terreno. Dado el comentario del inciso anterior, resulta evidente que las autoridades deben mostrar liderazgo y emitir ordenanzas que minimicen el riesgo y permitan al mismo tiempo la expansión armoniosa de las zonas pobladas. Huelga decirlo, tal legislación debería ser el resultado, no sólo de las consideraciones técnicas pertinentes, sino también de la consulta de los habitantes de las localidades en cuestión.

3. Elaboración de códigos de construcción. Esta es una medida asociada a la anterior, que disminuye aún más las pérdidas humanas y económicas. Como un ejemplo puede preverse un tipo de construcción especial para los hospitales y escuelas o silos de almacenamiento en lugares donde, aunque las inundaciones no sean periódicas, hayan ocurrido con consecuencias funestas en el pasado.

II.- Para modificar la distribución de agua:

Estas medidas van generalmente encaminadas a modificar las características que determinan el volumen de agua y su velocidad, y que hemos considerado en los párrafos precedentes: la intensidad del escurrimiento y el patrón de drenaje. Podemos citar, entre las más utilizadas, las siguientes:

1. Construcción de canales auxiliares de desagüe. Esta es, desde luego, una modificación del patrón de desagüe que puede ponerse en efecto en algunas situaciones, por ejemplo, cuando a través de estos canales pueden conectarse dos redes fluviales o cuando evitan el desplazamiento del agua a un sitio en particular.
2. Construcción de diques y barreras. Esta medida permite contener la entrada de aguas a sitios particulares, mantener el cauce de un río o desviar la dirección de las aguas hacia áreas de menor importancia o de diferente red fluvial.
3. Desazolve de canales y lechos de ríos. Dado que el movimiento natural de las aguas arrastra invariablemente cantidades diversas de sólidos, pueden presentarse acumulaciones de los mismos en algunas partes del fondo de un río o canal, sobre todo en aquéllas en las que el agua fluye a menor velocidad, con la consiguiente disminución en la velocidad de desagüe. El desazolve de canales es una de las actividades rutinarias de los servicios de mantenimiento fluvial.
4. Construcción de estanques auxiliares. Como los lagos y presas, estos contribuyen a la estabilidad de una red, puesto que pueden dar cabida a los excedentes de fluido cuando éstos se presentan.
5. Reforestación y modificación del tipo de cultivo o uso del terreno. Como hemos visto anteriormente, la cubierta vegetal reduce en gran manera el escurrimiento; algunas áreas que por el crecimiento poblacional han sido desmontadas y asfaltadas aumentan el escurrimiento promedio y alteran significativamente el comportamiento de un sistema de drenaje; por consiguiente, el uso del terreno debe ser planeado tomando en cuenta

estos factores. En algunos casos es incluso necesario modificar el uso del mismo y emprender trabajos de reforestación.

6. Cambio del curso de ríos o cañadas. Esta medida, como las primeras, es un cambio artificial del patrón fluvial y puede emprenderse satisfactoriamente en algunos casos.
7. Construcción de terrazas en laderas. Como hemos visto, esta medida está dirigida a modificar la pendiente de las laderas y usualmente se complementa con una reforestación de las terrazas para asegurar su resistencia a la erosión y disminuir adicionalmente el escurrimiento.

Las medidas señaladas son las más comúnmente utilizadas y pueden ser llevadas a cabo por las autoridades correspondientes o por comunidades organizadas, aunque algunas de ellas pueden ser puestas en práctica por los particulares a pequeña escala. En particular, los trabajos de reforestación nunca dejarán de ser benéficos en muchos sentidos, además del aquí considerado. Adicionalmente, pueden implementarse sistemas de alarma para alertar a la población y programas de protección civil que incluyen planes de evacuación y trabajos de emergencia para el control de las aguas.

Apendice IV

1) Algunas inundaciones historicas en el mundo

Lugar y/o país	Año	Muertes	Comentarios
China	1642	300,000	
Japón	1746	30,000	
Japón	1828	10,000	
Hunan, China	1887	900,000	
Río Yangtze, China	1911	100,000	Desbordamiento del río Amarillo
Hwang Ho, China	1931	350,000	
Pakistán e India	1955	1,700	
Fréjus, Francia	1959	412	
Barcelona, España	1962	470	
Valle del Arno, Italia	1966	113	
Rio de Janeiro y Sao Paulo, Brasil	1967	600	
Lisboa, Portugal	1967	457	
Gujart, India	1968	1,000	
Rapid City, E.U.A	1972	215	

2) Algunas inundaciones históricas en México

(Tomado de Noble y Lebrija, 1957)

- **24 de agosto de 1853:** sobre el lomerío de Mixcoac, una manga de agua aumenta el caudal del río, quedando arrasadas las cementeras y varias casas destruidas.
- **12 de julio de 1855:** el pueblo de Metztitlán, Hgo., es inundado por el exceso de lluvias. Estas comenzaron el 7 del mes anterior y duraron 43 días consecutivos. Se inundaron más de 11 leguas de largo y dos de ancho, con una profundidad de 45 varas; se perdieron las siembras y los depósitos de más de 12 mil cargas. 16 de julio de 1869: hubo una inundación en Colima, subiendo el agua en algunas casas a la altura de dos varas.
- **5 de julio de 1870:** después de cinco días de constante lluvia, se rompen los bordos de la presa en la hacienda de Salitrillo, Gto., y se forma un río que se extiende un kilómetro.
- **23 de julio de 1870:** el pueblo de Purísima del Rincón, Gto., sufre una inundación que destruye toda su parte oeste por rotura de la presa de la hacienda de San Bartolo.
- **20 de agosto de 1873:** en la noche, una manga de agua en Guanajuato hizo desbordar el río, que arrastra en las calles los animales que encuentra, algunos carruajes, derrumba puentes y casas; las pérdidas ascienden a \$150,810.00.
- **30 de mayo de 1874:** cae en Palmillas una manga de agua que inunda la población de Apizaco y terrenos adyacentes, causando grandes perjuicios.
- **2 de julio de 1874:** el río Consulado se desborda, inundando terrenos inmediatos, la hacienda de La Condesa y las calzadas Colonia y Arquitectos.
- **22 de julio de 1874:** el jefe político de Villa Álvarez, Oax., comunica que, a consecuencia de las fuertes lluvias de principios del mes, el río Atoloyac se desbordó. Las pérdidas fueron grandes. Los vecinos permanecieron en la iglesia y en un cerro cercano, tres días.
- **10 de abril de 1878:** por estos días llueve con tal abundancia en la frontera norte que se desborda el río Bravo, arrasando las siembras.

- **31 de agosto de 1878:** la abundancia de lluvias en este mes origina desgracias en varios lugares: en Morelia se interceptan los caminos, suspendiendo sus viajes la diligencia; se derrumban algunas casas y hay pérdidas de vidas; en Ameca, Jal., la abundancia de las aguas hace desbordar el río. Por estos días ocurren iguales desgracias por el mismo motivo en San Juan Teotihuacan. En Colima llueve del 19 al 21, y varios riachuelos se desbordan y forman un lago, haciendo desaparecer chozas y pueblos; en terrenos de Puebla las aguas invaden varias haciendas.
- **29 de septiembre de 1878:** se reciben noticias de la frontera norte: las lluvias, copiosísimas, han ocasionado inundaciones en extensos terrenos. Matamoros queda todo cercado de agua.
- **30 de septiembre de 1879:** en este mes ha habido inundaciones en Tabasco, calculándose las pérdidas en las siembras de maíz, cacao, tabaco, etc., en un millón de pesos. Diez buques naufragaron en la Barra de Santa Ana, y uno en Tonalá. En San Juan Bautista llueve durante ciento treinta horas consecutivas. En Tampico llueve más de ocho días consecutivos; varias poblaciones quedan destruidas, emigrando el vecindario, y lo mismo muchas haciendas, con pérdida considerable de ganado. Al tenerse las noticias de estas desgracias, se abren suscripciones y se dan funciones en las principales ciudades, destinando los productos al socorro de los inundados. El gobernador del estado viene personalmente a México para solicitar auxilios. La Cámara de Diputados dispone se dedique la suma de veinticinco mil pesos a favorecer a los que hayan padecido en la inundación; diez mil pesos para repartirlos, y quince mil para indemnizar al Erario de Tabasco, por la rebaja de contribuciones, en beneficio de los inundados.
- **10 de noviembre de 1879:** segunda inundación en Tabasco; todos los ríos se desbordan; el ganado tiene que refugiarse en lugares altos en donde padece mucho por falta de pasto; casas que resistieron la primera inundación se desploman en esta segunda. Los habitantes, enteramente agobiados, ya ni hacen demostraciones de dolor, sino que sufren callados, reconcentrados en sí mismos, siendo verdaderamente aterrador el cuadro de tanta ruina en medio de aquella muda desesperación.
- **28 de julio de 1880:** tempestad en Tula, Hgo., muy fuerte; el río se sale de cauce; varias casas quedan destruidas y perecen siete personas. También tempestad en Cadereyta, Qro.

- **3 de octubre de 1881:** copiosas lluvias hacen desbordar el río Papaloapan, y las calles de Tlacotalpan quedan inundadas.
- **17 de octubre de 1881:** en esta fecha había más de 1 000 casas inundadas en el puerto de Matamoros y la creciente del río Bravo era sin ejemplo.
- **28 de febrero de 1882:** son tan copiosas las lluvias en Culiacán, que los ríos se desbordan y se destruyen los sembrados, refugiándose las familias en las copas de los árboles.
- **30 de junio de 1883:** a consecuencia de las abundantes lluvias de estos días en el interior, comarcas enteras se convierten en grandes lagos. Entre Irapuato y Silao se desborda el Río de Guanajuato y es derribado un puente de fierro; entre Silao y León se destruye el terraplén. En los primeros días de julio se desborda el río Tula; en Querétaro pasan accidentes semejantes; en general, el resto del Bajío se convierte en lago; los trenes llegan únicamente hasta Celaya.
- **3 de octubre de 1885:** en la tarde de este día caen en México terribles aguaceros que ocasionan la inundación de una parte de la ciudad; varias casas sufren perjuicios.
- **25 de septiembre de 1886:** caen en México terribles aguaceros ocasionando una gran inundación que dura varios días, calculándose en más de 300 las casas dañadas.
- **18 de julio de 1888:** terrible tempestad en León, Gto., ocasionando los dos días siguientes una fuerte inundación en la ciudad; el agua sube un metro veinte centímetros; 2 232 casas son totalmente destruidas; las pérdidas se calculan en más de dos millones de pesos. Silao, Irapuato, Celaya, Guanajuato, Aguascalientes, Lagos y otras poblaciones también se inundan.
- **25 de abril de 1895:** catástrofe en Tijuana, B. C., a causa de las lluvias que desbordan el río en dos millas. Un vasto erial sin casas y sin vegetación.
- **16 de junio de 1899:** la inundación de Nuevo Laredo llegó a subir a 33 pies (máximo de la corriente); pasan de 30 las casas destruidas.

- **11 de agosto de 1904:** se desborda el río Consulado, se inundaron Santa Julia y San Rafael.
- **12 de enero de 1905:** excepcionales lluvias torrenciales caen en el estado de Sinaloa; se inunda Hermosillo, Son.
- **14 de noviembre de 1905:** las lluvias han sido torrenciales en El Fuerte, El Rosario, Elota, Quilá y San Dimas, en el estado de Sinaloa; en El Fuerte llueve sin cesar once días. En el estado de Sonora, en las poblaciones de Potam, a causa de la creciente del río Yaqui, quedan destruidas más de 100 casas.
- **27 de agosto de 1909:** fuerte temporal en Monterrey hace crecer las aguas, inundando gran parte de la ciudad; se perdieron 2,000 vidas y varios millones de pesos. En otras poblaciones de Nuevo León y Tamaulipas el ciclón que ha azotado el Golfo de México causa serias averías. Miles de familias quedan en la miseria.
- **7-8 de julio de 1911:** a consecuencia de las lluvias torrenciales en León, Gto., se desborda el arroyo del Muerto sobre el barrio del Coecillo. Inunda cerca de 400 casas.
- **4 de julio de 1912:** inundación de La Piedad, Mich.; más de media población queda sin hogar. Pérdidas de todas las cosechas del Bajío. La zona queda inundada en una superficie de 1,400 kilómetros cuadrados, en su mayor parte sembrados.
- **11 de julio de 1916:** las lluvias torrenciales de estos días en la región del Bajío ocasionan inundaciones en Irapuato, Gto., Dolores Hidalgo, Querétaro y otras poblaciones.
- **19 de septiembre de 1916:** las lluvias torrenciales que desde la noche del 17 han caído en el valle de México ocasionan la inundación y desbordamiento del Río del Consulado, que inunda la Colonia Vallejo.
- **18 de enero de 1921:** terrible inundación en Pachuca, Hidalgo; destruida la cortina de la Presa “El Sotol”, las aguas se precipitan sobre la población; se recogen más de 50 cadáveres.

- **26 de junio de 1921:** las aguas del río Colorado, en espantosa avenida, inundan varias poblaciones del Distrito Norte de la Baja California, causando varios perjuicios.
- **6 de enero de 1926:** informe de Nayarit indica que ha sido desastrosa la inundación del Río Santiago, muriendo más de 500 personas; hay 9 000 personas sin hogar y los daños materiales se estiman en más de un millón de pesos.
- **5 de julio de 1926:** inundación de la Villa de Guadalupe, D. F., el agua subió en algunas calles más de dos metros.
- **20 de septiembre de 1928:** se inunda la región de Pánuco por desbordamiento del río del mismo nombre, así como la destrucción de la población de Álamo, Ver., por desbordamientos del Tuxpan. La creciente del río Nazas estuvo a punto de inundar las ciudades de Lerdo y Gómez Palacio, Dgo.
- **17 de septiembre de 1929:** las inundaciones de Cosamaloapan, Ver., han sido gravísimas; el agua alcanzó una altura de dos metros.
- **31 de octubre de 1930:** avisan de Tabasco que por haberse desbordado el Río Huimanguillo, se ha inundado la región de la Chontalpa, así como Villahermosa, la capital.
- **30 de julio de 1931:** se desborda el riachuelo de La Magdalena en el Distrito Federal, ocasionando inundaciones en San Ángel, Mixcoac, Coyoacán y General Anaya.
- **19 de septiembre de 1931:** aguacero torrencial que dura 40 horas, inunda Veracruz y algunos barrios.
- **12 de octubre de 1932:** los aguaceros torrenciales inundan San Cristóbal de Las Casas, Chis., causando considerables pérdidas. Se dice que el agua subió más de un metro.
- **20 de agosto de 1934:** formidable aguacero acompañado de granizo cae sobre la ciudad de México, causando derrumbes e inundaciones en las colonias Juárez y Roma.

- **15 de julio de 1937:** inundación en León, Gto., subiendo el agua hasta un metro en algunos barrios.
- **17 de julio de 1939:** se desborda el Río San Francisco, inundándose el Barrio de La Luz en la ciudad de Puebla.
- **25 de septiembre de 1941:** desbordamiento del Río Consulado que ocasiona inundaciones en la parte norte de la ciudad; el pueblo de Ticomán queda arrasado por el derrumbamiento del Río de Los Remedios.
- **23 de octubre de 1941:** inundación de la población fronteriza de Río Rico; la abandonan sus habitantes, quienes se trasladan a Mercedes, Texas.
- **7-8 de septiembre de 1944:** creciente en el Río Nazas; en Parral, Chih., hay más de 100 muertos y 330 casas derrumbadas, quedando cinco mil personas sin hogar.
- **18 de mayo de 1948:** torrenciales aguaceros inundan diversos sectores de la ciudad de México; el agua alcanzó 50 cm en varios sitios.
- **19 de junio de 1950:** a consecuencia de los fuertes aguaceros se desborda el Río de La Piedad, inundándose la Colonia Roma Sur.
- **19 de julio de 1950:** los torrenciales aguaceros han provocado inundaciones en diversos lugares del municipio, y en Querétaro el agua invadió las carreteras, en algunos lugares subiendo más de un metro; se interrumpió el tránsito.
- **8 de septiembre de 1950:** tremenda inundación en la ciudad de México, sobre todo en la zona Norte, Noreste y centro de la ciudad.
- **9 de octubre de 1950:** nuevamente la ciudad de México quedó convertida en una laguna, a consecuencia de la tormenta que se abatió durante dos horas sobre el Distrito Federal.
- **9 de julio de 1951:** la tormenta sobre la ciudad de México hizo que el agua subiera en algunas colonias hasta dos metros. Ha habido derrumbes, y cuando menos trescientas familias han quedado sin hogar.

- **13 de julio de 1951:** torrenciales aguaceros han ocasionado la inundación de Tuxtla Gutiérrez, Chis. En León, Gto., igualmente ha tenido que cerrarse el comercio por estar inundadas las calles. De Tampico avisan que se teme que los ríos Pánuco y Tamesí se desborden. En Chacaltianguis, Ver., el tránsito está interrumpido porque las aguas invadieron una extensión de seis kilómetros.
- **4-6 octubre de 1999:** Inundaciones y deslizamientos de tierra ocurridas principalmente en Tabasco, Puebla, y Chiapas, como resultado de la depresión tropical Eleven dejan al menos 425 muertos.

Glosario

Amplitud de onda- Altura máxima de la cresta de una onda.

Astenosfera- La capa que subyace a la litosfera y está caracterizada por bajas velocidades sísmicas y alta atenuación de las ondas.

Basalto- Roca volcánica de color oscuro o negro, formada por solidificación de lava (extrusiva). Está compuesta por minerales entre los que abundan las plagioclasas, los piroxenos y en ocasiones los olivinos.

Caliza- Roca sedimentaria compuesta principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3).

Ciclo hidrológico- El ciclo completo de fenómenos que realiza el agua y que la llevan de su forma gaseosa (vapor) a sus formas líquida o sólida y a través de la precipitación la incorporan a las aguas subterráneas o corrientes superficiales para nuevamente regresar a su forma gaseosa en la atmósfera.

Detrito o escombros- El material proveniente del decaimiento o desintegración de las rocas.

Domo volcánico- Acumulación de rocas en la cima de un volcán, con forma redondeada similar a la de un domo.

Estrato- Una capa del mismo tipo de rocas.

Estratovolcán- Un volcán cuyo edificio ha sido formado por la acumulación de los productos de erupciones sucesivas.

Explosión:

- **freática-** Una explosión volcánica de gran violencia, ocasionada por la conversión de agua en vapor.

- **magmática-** Explosión volcánica de gran violencia causada por la rápida degasificación de un magma en su ascenso a la superficie.

- **freatomagmática-** Explosión volcánica freática y magmática.

Decaimiento radioactivo- El proceso por medio del cual los átomos de un elemento radioactivo se convierten en átomos más livianos y estables.

Epicentro- Punto de la superficie de la tierra directamente sobre el foco sísmico.

Fallamiento- Una fractura en la roca en la que las masas rocosas a ambos lados han sufrido un desplazamiento relativo paralelo a la fractura.

Fisiografía- El estudio de la forma y generación de las formas del relieve terrestre. Por extensión se dice así del relieve terrestre.

Foco Sísmico- Punto en el que comienza el fallamiento que ocasiona un temblor. Cuando un sismo es muy lejano, el área completa de ruptura es el foco.

Fractura- Superficie a lo largo de la cual la roca ha perdido cohesión o unión.

Fumarola- Un hoyo o abertura en el subsuelo, del que emanan vapores. Generalmente se encuentran en zonas volcánicas.

Granito- Roca de granos gruesos y colores claros, formada en el interior de la Tierra y compuesta por minerales entre los que los más comunes son el cuarzo y los feldespatos.

Gravímetro- Aparato para determinar el valor de la gravedad en un sitio dado.

Intemperismo- De intemperie; la acción del agua, sol y viento sobre cualquier material expuesto a ellos.

Inclinómetro- Aparato para determinar pequeñas inclinaciones del terreno en presas, grandes construcciones y volcanes.

Intrusión- Un volumen de roca magmática que invade una matriz rocosa más antigua.

Lava- Roca fundida en la superficie de la Tierra y que ha sido emitida por un volcán o fisura en un área volcánica.

Licuefacción- Proceso por el cual un material cambia sus características dinámicas y fluye con aquéllas parecidas a las de un líquido.

Litosfera- La parte más externa de la Tierra que contiene a la corteza terrestre parte del manto superior y esta segmentada en varias placas.

Magma- Mezcla de roca fundida y cristales con gases disueltos en el interior de la Tierra.

Manto de la Tierra- La parte de la Tierra contenida entre la corteza y el núcleo (aproximadamente entre las profundidades de 50 y 2 900 km).

Nivel freático- Superficie bajo la cual los poros de las rocas se encuentran llenos o saturados de agua.

Núcleo de la Tierra- Parte central de la Tierra; comienza a profundidades de 2 900 km.

Ondas internas- Las ondas compresionales (P) y las ondas transversales (S).

Ondas de Love- Ondas sísmicas producidas en la superficie por efecto de la estratificación y que se propagan por el movimiento horizontal de las partículas en sentido perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

Ondas P- La onda de compresiones y dilataciones que se produce en una zona de ruptura y que se propaga a través del interior de la Tierra.

Ondas S- Ondas más lentas que las ondas P y que se propagan asimismo en el interior de la Tierra. El movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

Ondas de Rayleigh- Onda superficial en que las partículas se desplazan en la misma dirección que la onda, realizando trayectorias elípticas.

Placa- Una parte o segmento de la litosfera con movimientos homogéneos respecto al resto de la litosfera.

Sedimentos- Material sólido depositado en un líquido en que es llevado en suspensión.

Solfataras- Un volcán semiextinto que sólo emite gases sulfurosos y vapor de agua.

Volcán monogenético- Un volcán que se origina durante una erupción y permanece después inactivo.

Referencias

- Esteva, L. M. y O. A. Rascon Chavez, 1985. *El sismo del 19 de septiembre de 1985*. Aspectos de Ingeniería. Ingeniería, LV, 3, p.34, México.
- Noble, G. y M. Lebrija, 1957. La sequía en México. *Soc. Mex. de Geogr. y Est.*, 2 Vols., México, 937 pp.)
- Scheidegger, A. E., 1975. *Physical aspects of natural catastrophes*, Elsevier, Amsterdam. 2000

Bibliografía

- De la Cruz-Reyna, S., M. A. Armienta, V. Zamora y F. Juarez, 1989. Chemical changes in spring waters at Tacaná Volcano, Chiapas, México: A possible precursor of the May 1986 seismic crisis and phreatic explosion. *J. Volc. Geoth. Res.*, 38, 345-353.
- Espíndola, J. M. y Z. Jimenez, 1984. Terremotos y ondas sísmicas. Cuadernos del Instituto de Geofísica, No. 1, UNAM, México.
- Macías Vázquez, J.L., L., Capra-Pedol, L.. 2005, Los volcanes y sus amenazas, Fondo de Cultura Económica, México
- Medina N., F., 1980. Vulcanología y evaluación del riesgo volcánico en México. *Anales Inst. Geofis.*, 26.
- Nava, A., 1987. Terremotos. *Colección la Ciencia desde México*, Fondo de Cultura Económica, México.
- Suarez, G. y Z. Jimenez, 1988. Sismos en México y el terremoto del 19 de septiembre de 1985. *Cuadernos del Instituto de Geofísica*, Núm. 2, UNAM, México.
- Whittow, J., 1980. *Disasters*. Pelican Books, England.

Juan Manuel Espíndola Castro

Juan Manuel Espíndola Castro realizó sus estudios de licenciatura en Física en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Obtuvo la maestría (1976) y doctorado (1979) en Geociencias en la Universidad Purdue (Indiana, E.U.A.). Actualmente es Investigador Titular “C” en el Departamento de Vulcanología del Instituto de Geofísica de la UNAM. El Dr. Espíndola es autor o coautor de “Terremotos y ondas sísmicas”, “Las catástrofes Geológicas” y “La actividad volcánica”, cuadernos de esta colección.



Las catástrofes geológicas

Juan Manuel Espíndola Castro

Los fenómenos geológicos provocan anualmente una cuota de pérdidas humanas que se encuentran intrínsecamente relacionadas con las condiciones geológicas de nuestro planeta Tierra. Aunque los fenómenos son inevitables, sus consecuencias destructivas pueden ser minimizadas considerablemente con un correcto conocimiento a partir de la comprensión de la naturaleza y el origen de estos eventos.

¿Cómo lograr convivir con estos fenómenos de forma cotidiana? En este Cuaderno, el lector podrá encontrar las ideas sustanciales para entender la naturaleza y el origen de fenómenos naturales tan desastrosos como los terremotos, las erupciones volcánicas, los derrumbes y las inundaciones; todo ellos presentes en la República Mexicana.