

Seguridad sísmica en la ciudad de México: algunas reflexiones



Antes, durante un temblor, no había explicación para las observaciones de las ondas visibles en las calles. Ahora son verosímiles por la posible existencia de ondas relativamente cortas y lentas.

Cinna Lomnitz

Un sismo es un fenómeno estremecedor. Cuesta imaginar una situación más aterradora que la de estar atrapado bajo los escombros de un edificio de concreto, con diez o quince pisos encima, sin esperanza de rescate y muriendo lentamente de sed. Sin embargo, el riesgo sísmico no es de origen natural: es netamente humano porque sólo el hombre construye estructuras que, a diferencia de los nidos de las aves o de las ardillas, se derrumban con las vibraciones del suelo.

En la ciudad de México, la más amenazada de la república, los edificios son susceptibles de caerse en una zona limitada, llamada *Zona III*. Se trata de la misma zona de suelos lacustres cubierta anteriormente por la Laguna de México. Ahí los edificios de siete a 18 pisos de alto se derrumban por obra de un tipo de onda sísmica peculiar, cuya naturaleza es controvertida. Unos dicen que se trata de una onda superficial conocida como tipo Rayleigh; otros afirman que es tipo Love, o de ondas amplificadas tipo SH. Hay quienes

pensamos que influye la fuerza de gravedad; otros lo niegan tajantemente. Muchos sostienen que son modos resonantes que se propagan dentro de la cuenca lacustre en dirección horizontal; otros, que son modos híbridos de un tipo nuevo y desconocido que se generan en la capa de lodo. En fin, no hay acuerdo y esta incertidumbre contribuye a la inacción y nos paraliza. ¿Qué puede hacerse?

LOS MODOS ACOPLADOS

En sismología, el acoplamiento de ondas es un fenómeno poco estudiado. Finalmente, en junio de 2000 detectamos una señal sísmica misteriosa que se propagó en el fondo del Océano Pacífico a la velocidad del sonido en el agua (1.5 km/s). Se registró a 2 mil kilómetros de distancia desde un epicentro situado bajo la zona de fractura Blanco, frente a las costas de Estados Unidos.

Esta onda (Figura 1) comparte algunas propiedades del sonido y otras de una onda sísmica tipo Rayleigh,

pero en realidad es una combinación de ambas. Hasta ahora se había confundido con las llamadas “ondas T”, que son ondas sonoras que suelen propagarse en un canal acústico a 700 metros de profundidad en el mar. La nueva onda (que llamamos “onda Ti”) fue observada por nuestro colega Rhett Butler en la nueva estación sísmica H₂O, que se encuentra sobre el fondo marino a casi 5 mil metros de profundidad.

Mediante simulaciones matemáticas pudimos comprobar que se trata de una superposición de modos superiores de ondas Rayleigh acoplados con ondas sonoras en el agua. Por eso viaja a la misma velocidad del sonido en el agua. El modo fundamental no se acopla porque su longitud de onda es mayor que la profundidad del agua. Hace cincuenta años, un grupo de científicos estadounidenses asociados con el profesor Maurice Ewing observó el mismo fenómeno en suelos, generado por acoplamiento de ondas sonoras en el aire. Creemos que este hallazgo fue utilizado para detectar explosiones nucleares a grandes distancias, y es acaso la razón por la que desde entonces no se haya publicado nada sobre este interesante efecto físico.

Nuestras observaciones submarinas acaban de publicarse tanto en México como en Estados Unidos, y el fenómeno podría tener un interés insospechado para ayudarnos a resolver el enigma del riesgo sísmico en el Valle de México. En efecto, resulta que dos o más modos aparentemente incompatibles pueden coexistir en un mismo medio: por ejemplo, modos acoplados con modos no acoplados. Es como si la Tierra, a veces, no pudiera decidirse entre asignarle un espesor finito o infinito al océano, dependiendo de la longitud de onda. El resultado es que aparecen ambos modos a la vez.

Algo similar podría estar pasando en el Valle de México, región geológica mucho más compleja que el fondo marino. Así, para grandes longitudes de onda, la propagación es afectada por el basamento calcáreo que aquí se encuentra a una profundidad de unos 3 kilómetros bajo el valle. Estas calizas se formaron hace unos 70 millones de años, cuando toda la región estaba cubierta con un mar de escasa profundidad. Para longitudes de onda más cortas de dos kilómetros es como si las calizas no existieran; entonces comienza a domi-

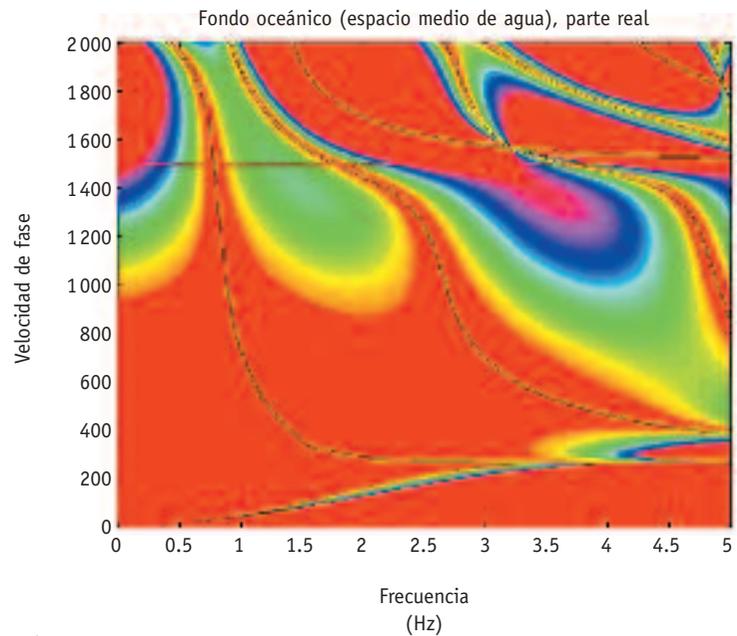


Figura 1. Gráfico de dispersión para el fondo del océano. Las líneas amarillas son los modos de propagación de las ondas Rayleigh.

nar la presencia de las lavas y de las tobas volcánicas que se depositaron sobre las calizas hace unos 12 millones de años, cuando las aguas se retiraron hacia las costas del Golfo de México. Los volcanes continúan depositando cenizas y lavas hasta el día de hoy y este material volcánico ya llega hasta elevaciones de más de 2 mil metros sobre el nivel del mar. Finalmente, para longitudes de onda del orden de 100 metros desaparece todo y domina el efecto de la capa de lodo proveniente de la Laguna de México, que tiene un espesor de apenas 30 metros bajo la zona urbana del centro de la ciudad.

La energía del sismo se reparte entre varios modos que pueden acoplarse cuando hay un modo común



La primera estructura mexicana con amortiguamiento ya se construye en el Paseo de la Reforma

La importancia de reconocer una posible coexistencia de ondas de diferente origen geológico estriba en su posible acoplamiento mutuo. Así, se ha observado que en la ciudad de México predomina una frecuencia de ondas sísmicas de 0.4 hz (correspondiente a un periodo de 2.5 s) en las tres configuraciones mencionadas. Por esta coincidencia, la energía del sismo se reparte entre varios modos que pueden acoplarse cuando hay un modo común, y así se canalizaría mucha energía a este modo común. Es un fenómeno hasta cierto punto inesperado, un tipo de resonancia que no se había estudiado.

Existe entonces una posibilidad real de que las ondas superficiales provenientes de un epicentro en la costa del Pacífico, al llegar a la ciudad de México, indujeran una fuerte resonancia en la delgada capa de lodo que cubre la parte baja de la ciudad. En 1988, S. K. Singh, actual jefe del Departamento de Sismología en la UNAM, y sus colegas calcularon la frecuencia de resonancia de esta capa y encontraron precisamente un valor de 0.4 a 0.5 hz. Es la frecuencia más peligrosa que contienen las ondas sísmicas.

¿Cómo surgiría esta resonancia en el subsuelo de la ciudad? Evidentemente existiría principalmente en la capa de lodo y no en otras zonas de la ciudad, como las lomas, por ejemplo. La propagación podría ser lenta (a velocidades menores de 180 km/h) lo que significa una longitud de onda de unos 120 metros. La onda rebotaría en los bordes de la ex Laguna, lo que explica la extraordinaria duración del fenómeno sísmico: hasta cinco o seis minutos en un sismo fuerte. Después de varias reflexiones el movimiento se tornaría caótico, asemejándose a una onda estacionaria como las que podemos observar en una laguna o en una marina.

Todo esto le podrá sonar relativamente obvio a un físico, pero no lo es para un sismólogo, porque hay varias y distintas posibilidades. La Tierra es un sistema complejo, y existe una infinidad de modelos estructurales que son compatibles con los datos que poseemos. Como acabamos de ver, las soluciones correspondientes a varios modelos de estructuras terrestres pueden coexistir, y la energía sísmica puede repartirse entre esas soluciones. El sistema es no lineal. Pero estas ideas podrían acercarnos considera-

blemente a una posible solución del problema sísmico en la ciudad de México.

CONCLUSIÓN

En efecto, hay observaciones antes inexplicables que empiezan a adquirir significado y sentido, como si fueran las piezas de un rompecabezas. Por ejemplo, hasta ahora no existía una explicación para las observaciones sobre ondas visibles en las calles durante un temblor. Estas ondas parecen propagarse con la velocidad de un automóvil y su longitud es de una cuadra o menos. Dejan marcas permanentes en el pavimento. Ahora tales observaciones se tornan verosímiles por la probable existencia de ondas relativamente cortas y lentas.

También ayudan a explicar los daños observados. Los edificios construidos sobre el lodo tienen pilotes que los sostienen, pero no ayudan a su estabilidad cuando el edificio tiene una altura de más de siete pisos. Se trata de un fenómeno de resonancia: los edificios de siete a 18 pisos de altura resuenan con vibraciones del orden de 0.4 Hz. Cada partícula del suelo se mueve en una elipse alargada que gira en sentido positivo (movimiento *prógrado*), como en el caso de las olas sobre un líquido. Como el material contiene principalmente agua, en suelos blandos se observa el mismo tipo de movimiento. En conclusión, hay efectos que tienen que ver con las propiedades especiales y un tanto exóticas del tipo de material que constituye el subsuelo de la zona central de nuestra ciudad.

Finalmente, ¿cómo construir en un tipo de suelo que genera modos resonantes prógrados de larga duración, monocromáticos y coherentes como un rayo láser? La ciencia aún no parece haber dado una respuesta clara a esta pregunta. Sin embargo, hay ingenieros que se especializan en el diseño de estructuras resistentes a este tipo de ondas: se llaman ingenieros navales. Los constructores de barcos saben desde hace siglos que las olas pueden voltear una nave, especialmente cuando tiene una altura excesiva. Se construyen barcos con un centro de gravedad lo más bajo posible, y la nave se amortigua para controlar el vaivén y el cabeceo causado por las olas.

Ya la primera estructura mexicana con amortiguamiento se construye en el Paseo de la Reforma, cerca



Figura 2. *Una visión del futuro cercano.* El edificio de la Torre Mayor se construye de acuerdo con los principios señalados en el Paseo de la Reforma de la ciudad de México. El edificio cuenta con 96 amortiguadores y será el más alto de América Latina.

de la Glorieta de la Diana. Se trata de la Torre Mayor (Figura 2), un edificio de estructura de acero de 57 pisos, que contiene 96 amortiguadores especiales a diferentes niveles. Sin duda, este logro histórico marcará un hito en la ingeniería mexicana. Espero que sea ampliamente imitado, ya que se trata no sólo de amornar el riesgo sísmico en la ciudad de México, sino de acabar con él para siempre.

Cinna Lomnitz es doctor en ciencias e investigador titular del Instituto de Geofísica de la UNAM. Su interés central es la investigación de ondas sísmicas “exóticas” como las que causan daños en edificios de la ciudad de México. Entre sus libros publicados destacan *Fundamentals of Earthquake Prediction* y *Seismic Risk and Engineering Decisions*.