



GEOLOGÍA

La dinámica de la Tierra

Carlos A. Cingolani
Víctor A. Ramos

La Tierra es un planeta dinámico, subdividido internamente en “capas” que interactúan dependiendo de la energía interna. Entre los procesos naturales que se manifiestan sobre la superficie están la actividad sísmica y volcánica que ha llamado siempre la atención de sus habitantes. ¿Por qué y cómo ocurren estos fenómenos? Conocer los procesos geológicos que dan lugar a estos cambios constantes nos dará la respuesta.

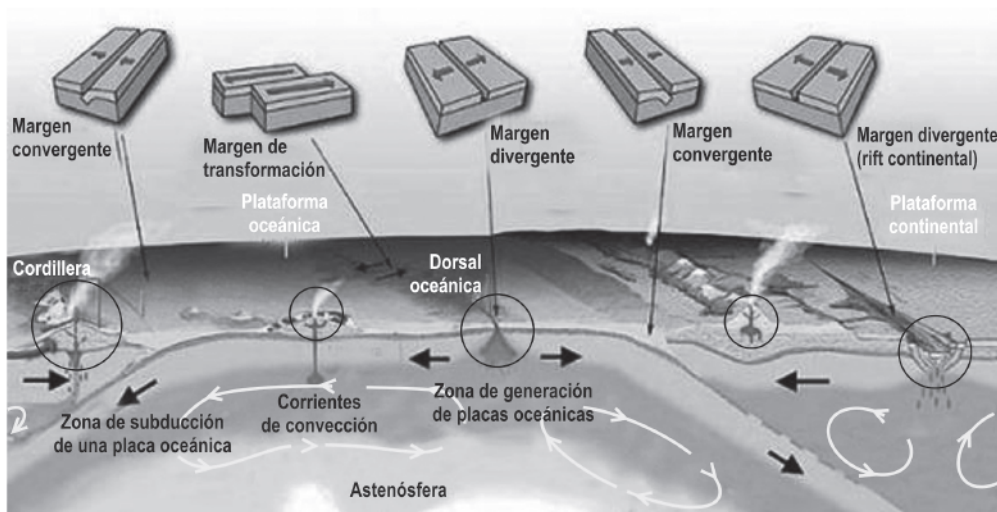
Las características del planeta son únicas en nuestro sistema solar y consisten en dinámicas interacciones que se remontan a unos 4.500 millones de años. Estas interacciones y transformaciones continuas han dado lugar a la presencia de 21% de oxígeno libre en la atmósfera, al desarrollo de la hidrósfera (ríos, mares, océanos), de la biósfera (compuesta por todos los seres vivos) y a la tectónica activa (volcanes, terremotos, desplazamientos de placas), de la que vamos a ocuparnos en este artículo. La energía interna planetaria originada por la cinética, es decir, el movimiento de las partículas desde la conformación del sistema solar y la aportada por los elementos radioactivos, ha sido la fuente calórica necesaria para que existan, entre otros fenómenos, la actividad sísmica, el volcanismo, las fuentes termales. Se agrega a esto todo lo que ocurre en la superficie vinculado a la acción de la energía solar, como los procesos erosivos, los ciclos hidrológicos, y otros, que modelan y cambian el paisaje terrestre permanentemente.

Las placas tectónicas

Los fragmentos más superficiales de la Tierra conforman las llamadas placas tectónicas litosféricas, con espesores de entre 100 a 250 km y con extensiones que varían entre cientos a miles de kilómetros (véase figura 1). Estas placas pueden estar compuestas por sectores *continentales* (que conforman los actuales continentes), que son los más antiguos, geológicamente complejos, de mayor espesor y menor densidad y por sectores *océánicos*, que constituyen gran parte de los fondos de los océanos y son esencialmente de composición basáltica, con menor espesor y de mayor densidad. Las técnicas modernas de posicionamien-



1 - Subdivisión de la corteza terrestre en las principales placas tectónicas y los diferentes contactos entre las mismas (convergente, divergente y transformante). Obsérvese que algunas placas (por ejemplo, la Sudamericana) están compuestas por zonas continentales y oceánicas. La actividad sísmica principal marca los límites de placas. Se señala la ubicación de las regiones de Haití, Maule (Chile), Japón, Sri Lanka, California y el "cinturón de fuego del Pacífico".



2 - Corte esquemático de la Tierra con su conformación interna y los movimientos de las placas por las celdas de convección. En las dorsales oceánicas o margen divergente se genera la corteza oceánica, en las zonas de subducción o margen convergente se destruye a medida que se hunde en el manto. En círculos están resaltadas las zonas donde se produce el volcanismo más importante.

to satelital (GPS), demuestran la complejidad de los desplazamientos de las placas, que se comportan como cuerpos rígidos movidos por corrientes de convección sobre la zona dúctil del manto terrestre. Los límites de las placas, que registran el 95% de la energía sísmica de la Tierra, interactúan a través de tres mecánicas principales que pueden verse en la figura 2:

- Los bordes de las placas se desplazan unos con otros y generan áreas de deformación angostas, como la zona de falla de San

Andrés en California (márgenes transformantes);

- o se separan unos de otros, y su desplazamiento determina la generación de dorsales submarinas de miles de kilómetros de largo que se emplazan sobre una zona de agrietamiento o *rift* (márgenes divergentes);

- o chocan entre sí, y uno se hunde por debajo del otro (de menor o igual densidad). Este último mecanismo, también llamado *subducción*, se asocia a zonas de deformación de cientos de kilómetros de ancho

formadoras de montañas en los bordes de placas, como por ejemplo, la cordillera de los Andes (márgenes convergentes).

¿Qué es un sismo? ¿Cuáles son las zonas donde se produce?

El sismo consiste en una serie de vibraciones producidas por movimientos o rupturas de rocas en los cientos de kilómetros más superficiales de la Tierra y son registrados por equipos sensibles llamados sismógrafos. Estos equipos tienen sus orígenes en aparatos utilizados desde la antigüedad en China (véase figura 3).

Desde hace varios años, la Argentina cuenta con una red de estaciones sismológicas que permiten definir los focos o hipocentros de los sismos, la vertical sobre

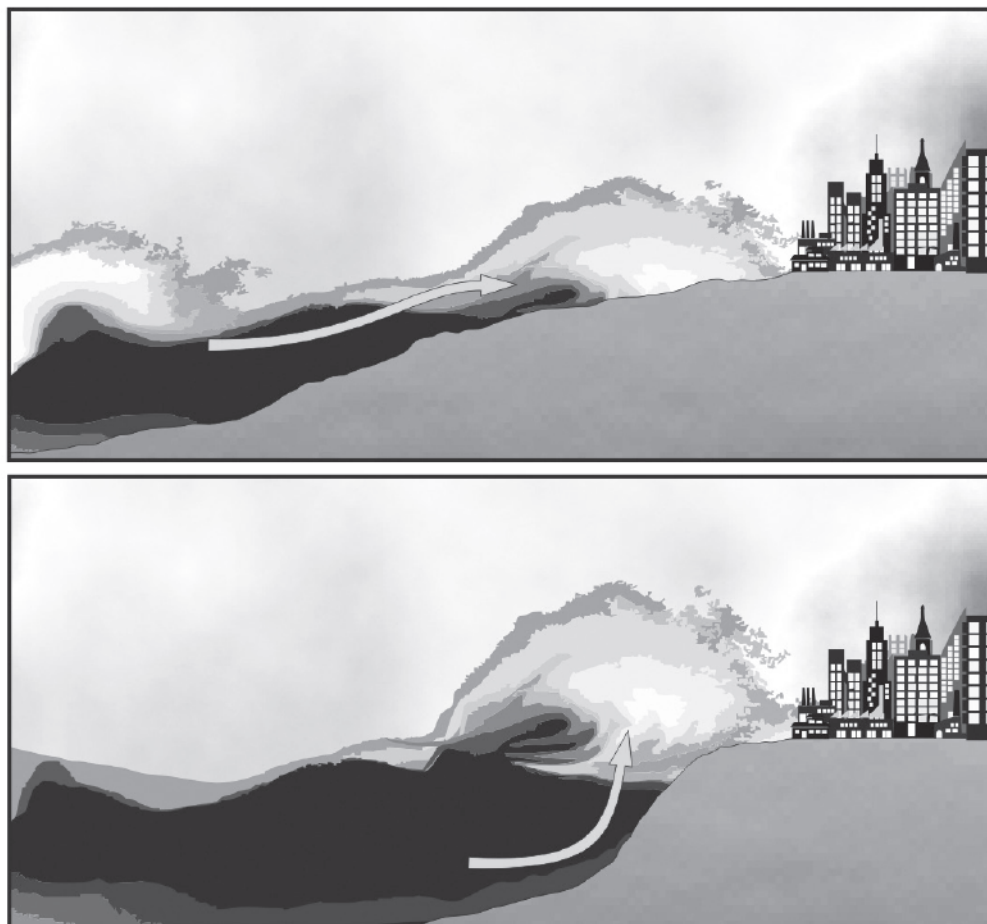
la superficie denominada epicentro y su duración e intensidad. Esta información se intercambia con redes nacionales e internacionales. Por el tipo de ondas que registra, el sismógrafo permite a los especialistas adjudicarlo o no a un evento geológico natural y separar otros registros como explosiones o vibraciones artificiales. Además de los márgenes de placas ya mencionados, los 20-30 km. de espesor más externos de la corteza terrestre que constituyen los continentes se pueden encontrar parcialmente fracturados. Estas fracturas, generalmente sepultadas debajo de cientos de metros de sedimentos, son debilidades que potencialmente pueden provocar fricción, produciendo vibraciones de distinta magnitud detectadas por los sismógrafos. Existen diferentes jerarquías de fracturas, algunas no sobrepasan pocos metros de largo, mientras que otras poseen miles de kilómetros de longitud en superficie y de 100 a 700 km. de profundidad conformando uno de los mecanismos de desplazamiento de las placas tectónicas. La ciudad de La Plata y sus alrededores se encuentran en la parte central de la denominada placa Sudamericana (en un ámbito llamado "pasivo") y se separa de la placa Africana a razón de 3 cm anuales; por el contrario, toda la costa chilena es un sector "activo" donde la placa de Nazca (parte del Océano Pacífico) se sumerge por debajo del continente a una velocidad relativa de 8 cm por año. Es de destacar que la Universidad Nacional de La Plata ha implementado su propia red sismológica.

Tipos de sismos

Los sismos se pueden dividir en dos grandes grupos: de *interplaca* y de *intra-placa*. Los primeros ocurren en el contacto entre dos placas y pueden ser muy destructivos en los márgenes de placas convergentes. Los segundos se producen en el interior de las placas tanto en los sectores continentales como en los oceánicos, pero como fuera expresado antes, la porción continental, que refleja una evolución de al menos 4.000 millones de años, puede estar muy fracturada por diversos eventos ocurridos a través de la historia geológica (por ejemplo la formación de nuevos océanos). Los terremotos



3 - Sismógrafo antiguo utilizado en la China para saber la magnitud y dirección de propagación de una onda sísmica. Dependiendo de la cantidad de bolillas que caían y en qué sapito, se podía estimar la importancia y orientación del terremoto.



que más afectan a la Argentina, que en su mayor parte está relativamente alejada del margen Pacífico, son de este tipo. A través de los sismogramas se pueden conocer sus mecanismos focales, que aportan información acerca del tipo de fracturas que los producen (extensionales, de desplazamiento de rumbo o compresivas). Resulta evidente entonces que el área sismogénica por excelencia se ubica en las zonas de *subducción* (margen convergente) y es del tipo interplaca. Cuando la fricción acumulada durante un tiempo considerable se “destraba”, la energía potencial que se libera origina importante sismicidad de interplaca y en muchos casos, actividad volcánica asociada.

¿Qué es un tsunami?

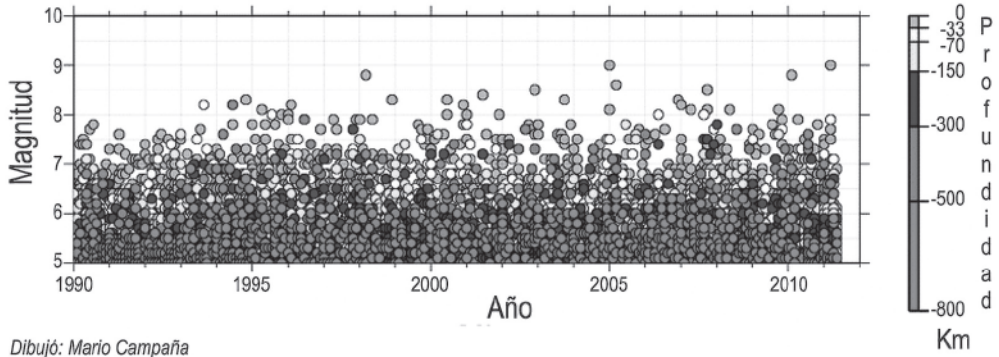
¿Hay registros en el pasado geológico?

Tsunami, palabra de origen japonés que significa “ola de puerto”, es una expresión que ilustra un importante movimiento de agua de mar conocido como “maremoto”.

4 - Esquema que ilustra el crecimiento vertical de un maremoto cuando se aproxima a la línea de costa.

Este es un evento que involucra un grupo de olas de gran energía generadas cuando se desplaza verticalmente una gran masa de agua como resultado de un sismo. Se pueden trasladar por centenares de kilómetros y su velocidad dependerá de la profundidad de agua en la que se haya producido el evento sísmico. La altura de la onda cuando llega a la costa se incrementa rápidamente como se puede observar en la figura 4, por lo que la morfología de la zona costera puede ser más o menos desfavorable. El terremoto de Japón en 2011 es un ejemplo de un importante maremoto que se expandió por todo el Pacífico. Conociendo la profundidad de agua en el epicentro del terremoto los sismólogos pueden calcular la velocidad de propagación de la onda y sus tiempos de arribo a las costas opuestas, permitiendo así las actividades de prevención o defensa.

Luego del sismo de 2004 en Sri Lanka y alrededores, el estudio de los tsunamis



Dibujó: Mario Campaña

fósiles ha tomado gran impulso. Se sabe que en el siglo IX se produjo un sismo similar al que ocurrió recientemente en Japón. Hay registros de un tsunami que ingresó con grandes olas, desplazó enormes masas de agua e invadió más de 10 km al interior de Japón. Los científicos habían predicho una recurrencia promedio de centenares de años. Por otra parte, los geólogos han descrito en varias localidades rocas generadas por estos maremotos en el pasado geológico: se denominan *tsunamitas*. Asimismo, la actividad sísmica del pasado ha quedado documentada en secuencias sedimentarias

5 - Frecuencia de terremotos mayores a 5 en la escala de Richter (tomado del Servicio Geológico de los Estados Unidos).

con características particulares que reciben el nombre de *sismitas*.

La frecuencia de los terremotos

La superficie terrestre puede ser subdividida en zonas de mayor o menor potencial sísmico. No existen zonas asísmicas (o libres de sismos). Hay una estadística de frecuencia de registros clasificados de 5 a 7 en la escala de Richter entre 1990 y 2005

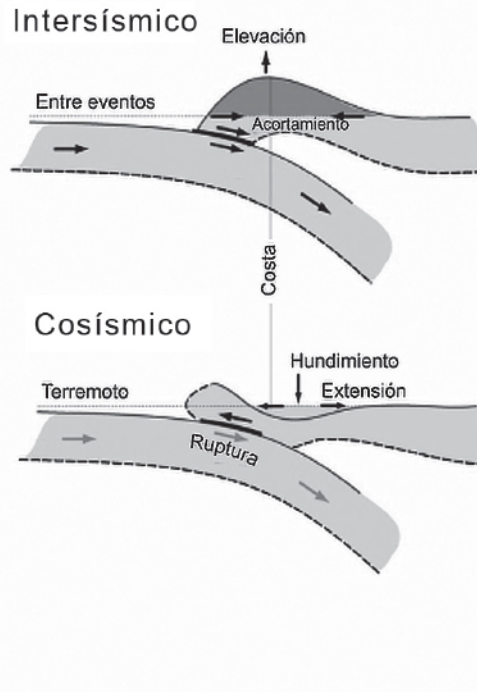
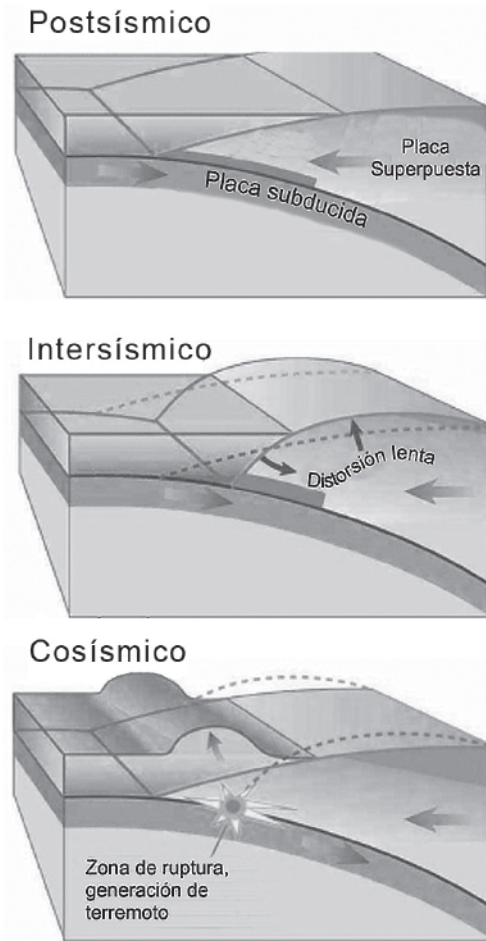


Casa Lera

Sanitarios & Repuestos



Diag. 79 N° 319 La Plata. Tel: (0221) 425-3625



Dibujó: Mario Campaña

de aproximadamente 1500 sismos por año, que se ha mantenido sin mayores variantes (véase figura 5) y un evento de características mayores a 8,5 en cien años. Hay sectores del planeta en los que desde hace mucho tiempo no se producen movimientos, este "gap sísmico" nos induce a pensar que puede ocurrir actividad en algún momento, pero aún resulta difícil dar mayores precisiones.

Los sismos de intraplaca registrados en las zonas de la llanura bonaerense y alrededores

Algunas de las fracturas inactivas en el interior de las placas ubicadas a cientos o miles de metros de profundidad bajo las llanuras o planicies de los ríos más modernos, suelen producir sismos de intraplaca. En varios sectores de la llanura pampeana y del litoral se han registrado sismos motivados por ajustes o movimientos de antiguas fallas geológicas (cuenca del Salado, fosas tectónicas del Río de la Plata y zonas del

6 - Tipos de desplazamiento sísmico asociado al ciclo de un terremoto.

Delta del Paraná, entre otros). Hace más de cien años, un sismo de grado 4,3 y profundidad de 30 km conmovió a la ciudad de Buenos Aires. Las antiguas fracturas lejos de los bordes de las placas, en general, permanecen imperturbables por miles de años, hasta que repentinamente ceden y producen algún movimiento sísmico. Por ejemplo las rocas del basamento del Río de la Plata se encuentran fracturadas, en gran medida como herencia del momento en el cual América del Sur y África comenzaron a separarse formándose grandes fallas o fracturas que quedaron en ambas márgenes del océano Atlántico.

Algunos ejemplos son los sismos detectados o sentidos en la Provincia de Buenos Aires: en 1827 en San Nicolás; en 1845 en la cuenca del Salado (magnitud 5, profundidad 30 km); en 1888 (magnitud 4,3; profundidad 30 km) y en 1907, ambos

con epicentro en la zona del Río de la Plata; en 1945 en Martínez; en 1948 (magnitud 4,3) y en 1949 (magnitud 3,7) en Brandsen y San Vicente respectivamente; en 1970 en Berisso (magnitud 3,5) y en 1971 en Vieytes y alrededores (de magnitud 3,7).

¿Cómo se clasifican los desplazamientos durante un sismo?

Se reconocen diferentes tipos de desplazamientos asociados a un terremoto (véase figura 6). Los desplazamientos *cosísmicos* son aquellos que se producen durante el evento principal y pueden alcanzar decenas de metros; los *postsísmicos* son aquellos que duran días, semanas o meses, dependiendo del desequilibrio producido por el terremoto, provocan desplazamientos de hasta varios centímetros, y finalmente los *intersísmicos*, que son los desplazamientos normales que ocurren entre sismos, y que suelen ser de varios milímetros a unos pocos centímetros.

Algunos ejemplos mundiales de sismos recientes

Haití 2009: Con varios órdenes de magnitud menor al del Maule en 2010 (Chile) o al de Japón en 2011, la catástrofe se produjo por una falla de desplazamiento de rumbo. Causó decenas de miles de muertos por no existir en Haití clara conciencia de que está situado en una zona sísmicamente activa (en cercanías de un margen transformante), con el agravante de que hace unas pocas decenas de años tuvo que desplazarse la ubicación de su capital por la destrucción durante un terremoto. La falta de “cultura sísmica” explica que no se hayan previsto construcciones sismo-resistentes, aún en edificios de varios pisos construidos recientemente para organismos internacionales.

El “megaterremoto” de 8,8 del Maule (Chile) en febrero de 2010: Hace varios años que los sismólogos chilenos esperaban un terremoto en ese sector de la costa. El último evento importante había sido descrito por Charles Darwin en 1835. Los desplazamientos intersísmicos acumulados durante 175 años permitían predecir un terremoto

La ciudad hundida

En la región Mediterránea, la actividad volcánica ha sido de tal magnitud que algunos autores afirman que el mito de la *Atlántida* está basado en la dramática desaparición de la Civilización Minoica que habitaba en Creta en el siglo XVI a.C. Las olas que generó la explosión de la isla volcánica de Santorini destruyeron por completo la ciudad de Teras, que se situaba en ella y que era el principal puerto comercial de los minoicos; se produjo además un fuerte maremoto que destruyó parcialmente la isla de Creta.

con desplazamientos mayores de 15 metros y estimar magnitudes del orden de 8,5 en la escala de Richter. Infelizmente los pronósticos sismológicos con detallados estudios con GPS y otros instrumentos fueron acertados, aunque no se podía precisar el momento en que iban a ocurrir.

¿Qué ocurrió en Japón 2011?

El sismo de Japón sucedió en una zona donde estos eventos de gran magnitud ocurren de manera frecuente. Se trata de una “zona roja” dentro de lo que se conoce como “cinturón de fuego del Pacífico”, donde interactúan varias placas tectónicas (véase figura 1) y causan sismicidad y volcanismo. En Japón todas las construcciones, incluso las críticas como las centrales nucleares, respondieron bastante bien al terremoto; lo que las afectó fue el tsunami que se produjo después, para lo cual había sido prevista una defensa para olas de 6 m, que fue ampliamente superada.

¿Se puede predecir un movimiento sísmico?

Los estudios sobre riesgos geológicos permiten establecer la zona que puede ser afectada por un movimiento sísmico y la intensidad que éstos podrían llegar a tener dentro de un rango preestablecido, pero aún no hay forma segura de predecir exactamente cuándo ocurrirá. Con el uso de modernas tecnologías como el despla-

zamiento anual medido por datos de GPS, o por “interferometría” de varias imágenes satelitales tomadas con diferencias de fracciones de segundos, minutos o días o con tomografías de alta resolución, se puede llegar a determinar qué zonas o sectores tienen un comportamiento anómalo. Los chinos, cuyo país ha registrado los terremotos con mayor cantidad de víctimas conocidos desde hace centenares de años, han desarrollado métodos muy sencillos para detectarlos a través del comportamiento de ciertos animales. Por ejemplo, los sapos comunes (*Bufo bufo*), las aves de corral, los caballos y mulares, y en otros lados, los elefantes, entre otros, registran un comportamiento de alta nerviosidad horas antes de los terremotos. Esto ha sido interpretado como resultado de su capacidad auditiva de frecuencias bajas a las que se asocian los temblores de basamento que se producen con anterioridad a la fase sísmica principal.

La prevención

En la Argentina, instituciones como el Instituto Nacional de Prevención Sísmica de San Juan (INPRES) o el Servicio Geológico-Minero Argentino (SEGEMAR), publican mapas de riesgos naturales que son fundamentales para analizar la información recibida y regular las obras o construcciones bajo estrictas normas sismo-resistentes. Antes del terremoto que destruyó la ciudad de San Juan en 1944, el país no tenía estudios detallados que pudieran ayudar a prevenirlo. A partir de allí se inició la sismología sistemática en nuestro país con registros regulares de la actividad, la aceleración máxima de estos eventos y sus hipocentros. Sobre esta base se establecieron las normas de construcción que permitieron salvar vidas ante estos eventos naturales. El terremoto de Caucete en 1977, cercano a la ciudad de San Juan, que fue de magnitud similar al que ocurrió en 1944, produjo daños menores dado que la ciudad había sido reconstruida con adecuadas regulaciones y normas sismo-resistentes.

Además de preparar a la población convenientemente para tales emergencias, muchas ciudades alrededor del Pacífico, sobre todo en México, Perú, Japón, Ecuador,

Hawái y Chile, disponen de sistemas de alarma y planes de evacuación en caso de un maremoto peligroso. Diversos institutos geológico-geofísicos de diferentes partes del mundo se dedican a la previsión de maremotos y la evolución de éstos es monitoreada en forma permanente con la ayuda de satélites. Es relevante trabajar en la prevención para evitar los casos como Haití, con numerosas víctimas. También es imprescindible dedicar esfuerzos en una adecuada información de la población para mitigar los efectos de los eventos naturales y llegar a una actividad sustentable instrumentando planes de emergencia desde la escuela primaria.

¿Qué vinculación tienen los sismos con la actividad volcánica?

Cabe señalar que nuestro planeta y el satélite de Júpiter llamado Io, son los únicos que presentan, aunque con diferentes características, volcanismo activo. Como se ilustra en la figura 2, las zonas sismogénicas pueden también vincularse en forma directa con la actividad volcánica. La más relevante es el contacto entre placas (zona de *subducción*) o de interplaca. El caso del volcanismo reciente de la zona de Puyehue-Caulle en Chile, cuyos productos aéreos provocados por la erupción tuvieron una gran expansión, es porque parte de la energía planetaria está siendo liberada rápidamente durante la actividad volcánica, y puede manifestarse en forma más o menos explosiva. Los volcanes dan clara idea de la energía que existe en el interior del planeta, que también es liberada en forma lenta por transmisión del calor desde el núcleo y manto terrestre hacia las rocas que conforman las capas más externas de la Tierra. La actividad volcánica se puede originar en un determinado sitio a lo largo de miles de años y construir edificios volcánicos de grandes dimensiones (el planeta Marte expone volcanes extintos de más de 25.000 m de altura) o manifestarse como pequeños conos. En la cadena Andina los volcanes forman una parte importante de su paisaje. También se presentan en sectores extrandinos o al pie de la cordillera, pero de menor tamaño. La actividad volcánica puede ser destructiva o catastrófica, pero

también como contraparte puede ser utilizada como energía geotérmica (véase el trabajo de Eduardo Jorge Llambías en esta publicación), como fuentes saludables de aguas termales, materiales de construcción e incluso para el desarrollo del turismo en los denominados parques o reservas volcánicas.

Es importante subrayar que los registros de sismos y actividad volcánica no se han incrementado según las pruebas estadísticas. Ahora se dispone de mayor cantidad de equipos y mejor tecnología (sismógrafos de última generación, equipamiento GPS, imágenes radar satelitarias, entre otros) que nos permiten acceder a una información rápida, casi en tiempo real y que luego es difundida mundialmente por todos los medios de comunicación (antes había que usar el telégrafo). El *Global Earthquakes Model* (GEM), donde participan profesionales de nuestro país, es una red institucional que estudia los registros de los terremotos más importantes del mundo. Uno de los objetivos inmediatos de esta institución es el diseño de modelos probabilísticos para la actualización de códigos de construcción en zonas de riesgos naturales. La información generada resulta en una base de datos pública y accesible.

La dinámica de la Tierra que hemos bosquejado ha sido la que ha permitido el desarrollo de la litósfera con sus placas tectónicas y su “geodiversidad”, la atmósfera actual (rica en oxígeno y, en los niveles superiores, la capa de ozono protectora de los rayos ultravioletas), la hidrósfera y la biósfera con toda su biodiversidad a través de millones de años de evolución geológica. Cualquier alteración importante de uno de estos sistemas influirá sobre los otros, por ello es importante el “conocimiento del pasado geológico para comprender el presente”.◆

Lecturas sugeridas

Acerca de los sismos en la provincia de Buenos Aires, puede consultarse S. Gershanik, *Sismología*, La Plata, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, 1996; E. Jaschek, “¿Hay sismos en la Provincia de Buenos Aires?”, en *Ciencia e Investigación*, 28 (1-2):26-29, 1972; N. Sabbione, *Implementación de la red de estaciones sismológicas de la Universidad Nacional de La Plata. Aplicaciones*. Tesis de Doctorado en Geofísica. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, 2004. Inédito.

Para leer más sobre el comportamiento de los animales ante la inminencia de un sismo, véase R. A. Grant y T. Halliday, “Predicting the unpredictable; evidence of pre-seismic anticipatory behaviour in the common toad”, en *Journal of Zoology*, 281(4):263-271, 2010.

Acerca de la formación de volcanes, y de su potencial uso como fuente de energía, véase E. J. Llambías, *Volcanes. Nacimiento, estructura, dinámica*, Buenos Aires, Vázquez Mazzini Editores, 2009.

Carlos A. Cingolani. Profesor titular de la UNLP e investigador de CONICET. Jefe de la División Geología del Museo de La Plata (UNLP). Víctor A. Ramos. Profesor Titular de la UBA e investigador de CONICET. Director del Instituto de Estudios Andinos (IDEAN). Correspondencia a Carlos Cingolani: carloscingolani@yahoo.com o bien cingola@fcnym.unlp.edu.ar. Los autores agradecen a la licenciada A. Bidone por la colaboración prestada en la búsqueda bibliográfica.