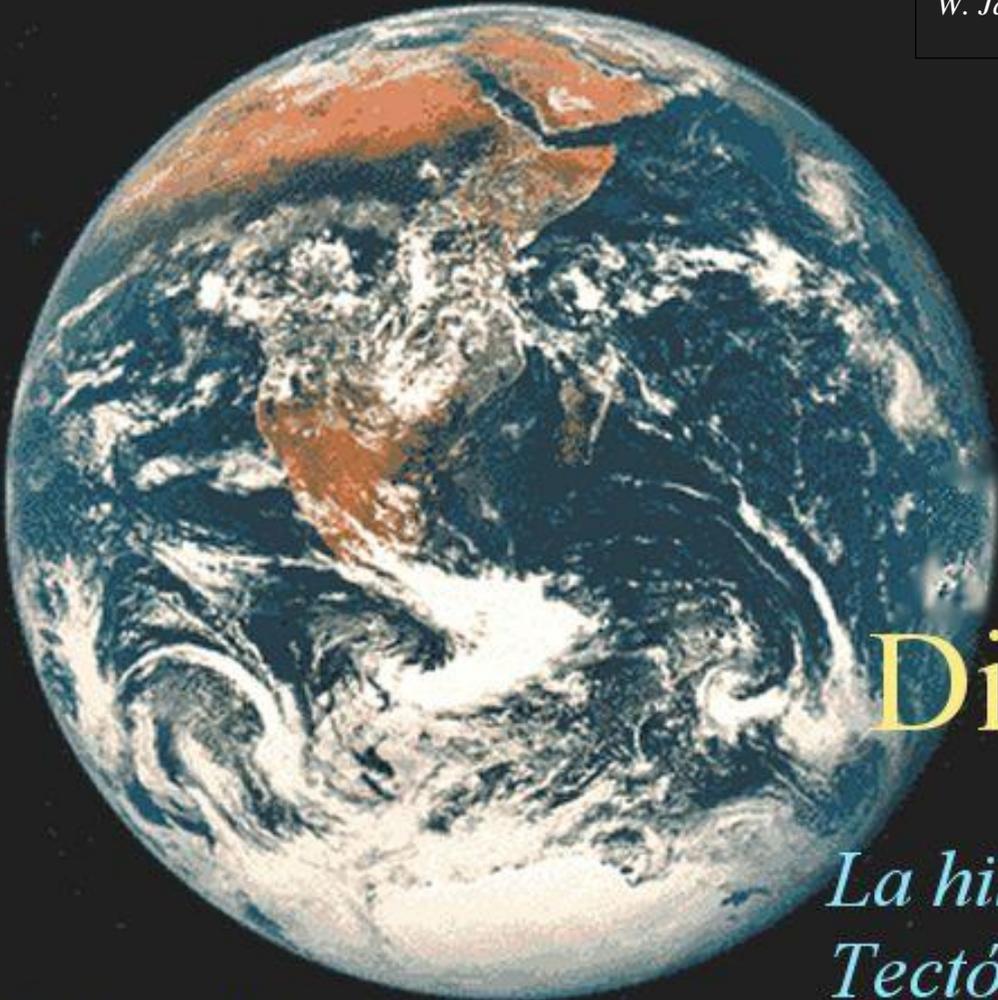


W. Jacqueline Rious y Robert I. Tilling

A photograph of Earth from space, showing the Red Sea and the African continent. The image is a circular view of the planet, with the Red Sea clearly visible in the upper portion, separating the Arabian Peninsula from the African continent. The rest of the planet shows various landmasses, oceans, and cloud patterns.

Esta Tierra Dinámica

*La historia de la
Tectónica de Placas*

Edición en línea

Vista del planeta Tierra desde la nave espacial Apolo. El Mar Rojo, que separa Arabia Saudita del continente africano, es claramente visible en la parte superior. (Fotografía cortesía de la NASA).

Esta Tierra Dinámica

La Historia de la Tectónica de Placas

Por W. Jacqueline Rious y Robert I. Tilling

La versión pdf en inglés fue editada por Peter Lindeberg en diciembre de 2001. Cualquier desviación del texto original no es intencional.

Este libro se publicó originalmente en papel en febrero de 1996 (diseño y coordinación de Martha Kiger; ilustraciones y producción de Jane Russell).

Está a la venta por \$7 en: US Government Printing Office Superintendent of Documents, Mail Stop SSOP Washington, DC 20402-9328, o se puede pedir directamente al Servicio Geológico de EE. UU.

Llame sin cargo al 1-888-ASK-USGS, o escriba a USGS Information Services Box 25286, Edificio 810, Denver Federal Center Denver, CO 80225303-202-4700; Fax 303-202-4693, ISBN 0-16-048220-8, Versión 1.08

La edición en línea contiene todo el texto del libro original en su totalidad. Algunas cifras se han modificado para mejorar la legibilidad en las resoluciones de pantalla. Muchas de las imágenes de este libro están disponibles en alta resolución de la página USGS Media for Science.

Página de inicio del Unites State Geological Service USGS:

URL: <http://pubs.usgs.gov/publications/text/dynamic.html>

Última actualización: 01.29.01. Contacto: jmwatson@usgs.gov

Traducción al español por A. González Arias, quien está en deuda con el Dr. Robert I. Tilling por haberle enviado una copia dura del original con su firma, hace ya unos cuantos años (2001). Adaptado de la edición en línea y el original. La Habana, Marzo/2023.



Acerca de los autores



W. Jacquelyne Kious

Jackie Kious es oriunda del Área de la Bahía de San Francisco. Siempre ha tenido interés en escribir, ya que comenzó como estudiante de Periodismo en Skyline College. Luego fue aceptada en el programa Special Major en la Universidad Estatal de San Francisco. Este programa le permitió diseñar su propia especialización combinando su interés en la tierra y las ciencias biológicas con la escritura. Desde que recibió su licenciatura en Redacción científica de la Universidad Estatal de San Francisco, Jackie ha escrito artículos sobre temas que van desde huellas dactilares de ADN y el proyecto del genoma humano hasta la biodiversidad en las selvas tropicales y la meteorología.

En 1991, asistió a una jornada de puertas abiertas en la sede regional occidental del Servicio Geológico de EE. UU. (USGS) en Menlo Park, donde descubrió el programa Voluntarios para la Ciencia. Se inscribió para ofrecer su tiempo como voluntaria y fue referida a la División Geológica, que había querido producir una publicación de interés general sobre la tectónica de placas durante algún tiempo. Después de modificar un borrador preexistente, se asoció con el vulcanólogo Bob Tilling para comenzar a escribir *This Dynamic Earth* en enero de 1992.

Jackie es asistente administrativa en el Departamento de Bomberos de South San Francisco. Además de su trabajo voluntario con el USGS, actualmente está escribiendo una historia del Departamento de Bomberos del Sur de San Francisco y asiste en eventos de recaudación de fondos para la Casa Ronald McDonald y es ciudadana voluntaria en un departamento de policía local.



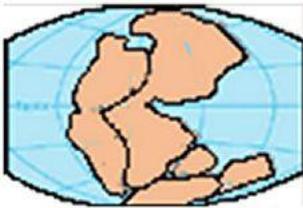
Robert I. Tilling

Nacido en Shanghai, China, Bob Tilling creció en el sur de California (cerca de San Diego). Recibió su BA de Pomona College y un Ph.D. en geología de la Universidad de Yale, antes de unirse al Servicio Geológico de EE. UU. (USGS) en 1962. El Dr. Tilling ha trabajado como vulcanólogo durante casi 25 años, comenzando con su asignación en 1972 al Observatorio de Volcanes de Hawái (HVO) del USGS, convirtiéndose en su Científico a Cargo en 1975. Posteriormente se desempeñó (1976–81) como Jefe de la Oficina de Geoquímica y Geofísica, en la sede del USGS en Reston, Virginia, y estuvo a cargo de los estudios del USGS antes, durante, y tras la catastrófica erupción del Monte Santa Helana el 18 de mayo de 1980. Por tanto, Bob no es ajeno a los impactos peligrosos de la tectónica de placas.

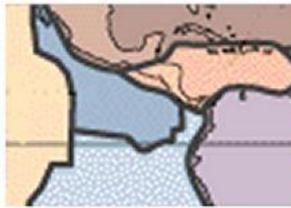
Desde que "regresó" a un puesto de investigación en 1982, el Dr. Tilling reanudó sus estudios de fenómenos eruptivos y peligros asociados en los EE. UU. y en el extranjero. Ha escrito muchos artículos –técnicos y de interés general – y se ha desempeñado como consultor invitado en varios países extranjeros (por ejemplo, Colombia, Ecuador, Islandia, Indonesia y México). En febrero de 1996 Bob acordó una vez más aceptar un puesto gerencial: Científico Jefe del Equipo de Peligros Volcánicos del USGS, que es responsable de monitorear los volcanes activos en los EE. UU. y evaluar sus peligros potenciales. En octubre de 1999 volvió a "rotar" a un puesto de investigación.

Desde 1987 Bob ha trabajado en el centro regional occidental del USGS en Menlo Park, California; vive con su esposa, Susan, en las estribaciones de las cercanas montañas de Santa Cruz. Tienen dos hijas adultas, Bobbi y Karen, ambas viviendo en el Área de la Bahía de San Francisco, y un nieto (Peter). Cuando no está estudiando volcanes, a Bob le gusta esculpir, hacer caminatas, jugar racquetball, escuchar música (clásica y country) y degustar vinos finos.

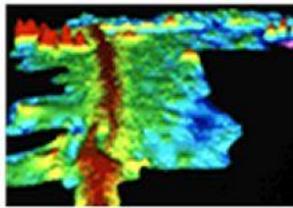
Contenido



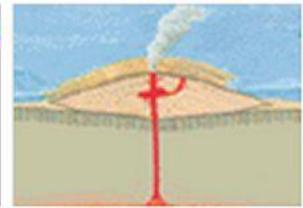
Prefacio



Perspectiva histórica



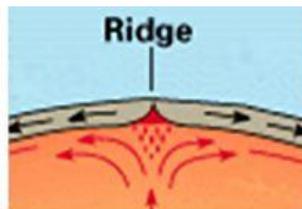
Desarrollo de la teoría



Comprendiendo el movimiento de las placas



"Puntos calientes":
Chimeneas en el manto



Algunas preguntas
aún sin respuesta



Las placas tectónicas
y la población



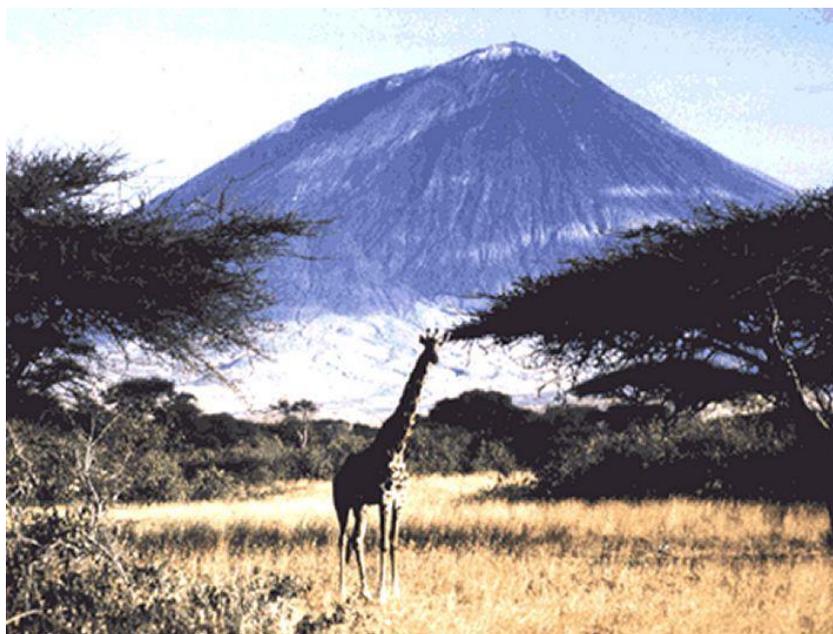
Notas finales

Prefacio

A principios de la década de 1960, el surgimiento de la *teoría de la tectónica de placas* inició una revolución en las ciencias de la tierra. Desde entonces, los científicos han verificado y refinado esta teoría, y ahora tienen una mejor comprensión de cómo nuestro planeta ha sido moldeado por los procesos tectónicos de placas. Ahora sabemos que, directa o indirectamente, las placas tectónicas influyen en casi todos los procesos geológicos, pasados y presentes. De hecho, la noción de que toda la superficie de la Tierra está cambiando continuamente ha cambiado profundamente la forma en que vemos nuestro mundo.

Las personas se benefician – y también están a merced de las fuerzas y consecuencias – de la tectónica de placas. Con poca o ninguna advertencia, la erupción de un terremoto o volcán puede desatar ráfagas de energía mucho más poderosas que cualquier otra cosa que podamos generar. Si bien no tenemos control sobre los procesos de la tectónica de placas, ahora tenemos el conocimiento para aprender de ellos. Cuanto más sepamos sobre la tectónica de placas, mejor podremos apreciar la grandeza y la belleza de la tierra en la que vivimos, así como las ocasionales demostraciones violentas del asombroso poder de la Tierra.

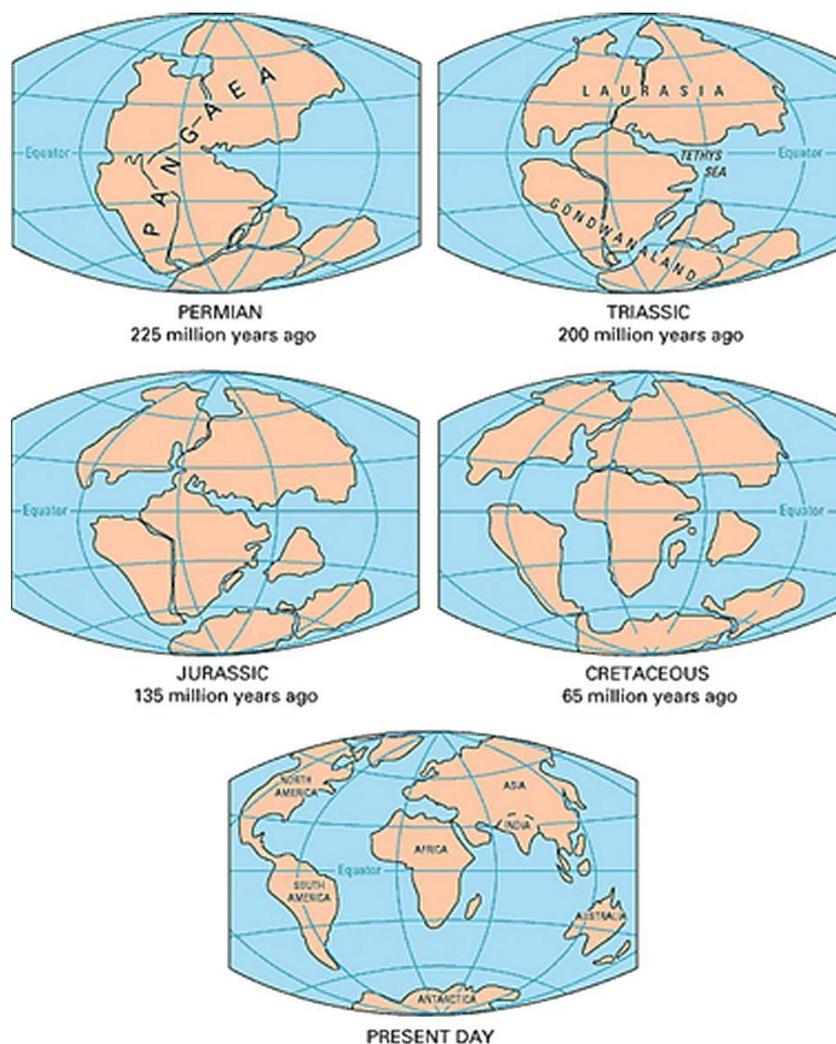
Este folleto brinda una breve introducción al concepto de tectónica de placas y complementa la información visual y escrita en *This Dynamic Planet* (ver **Lecturas adicionales**), un mapa publicado en 1994 por el Servicio Geológico de EE. UU. (USGS) y la Institución Smithsonian. El folleto destaca algunas de las personas y descubrimientos que impulsaron el desarrollo de la teoría y rastrea su progreso desde su propuesta. Aunque la idea general de la tectónica de placas ahora es ampliamente aceptada, muchos aspectos continúan confundiendo y desafiando a los científicos. La revolución de las ciencias de la tierra lanzada por la teoría de la tectónica de placas no ha terminado.



Oldoinyo Lengai, un volcán activo en la Zona del Rift de África Oriental, donde África está siendo separada por procesos de placas tectónicas. (Fotografía de Jorg Keller, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Alemania.

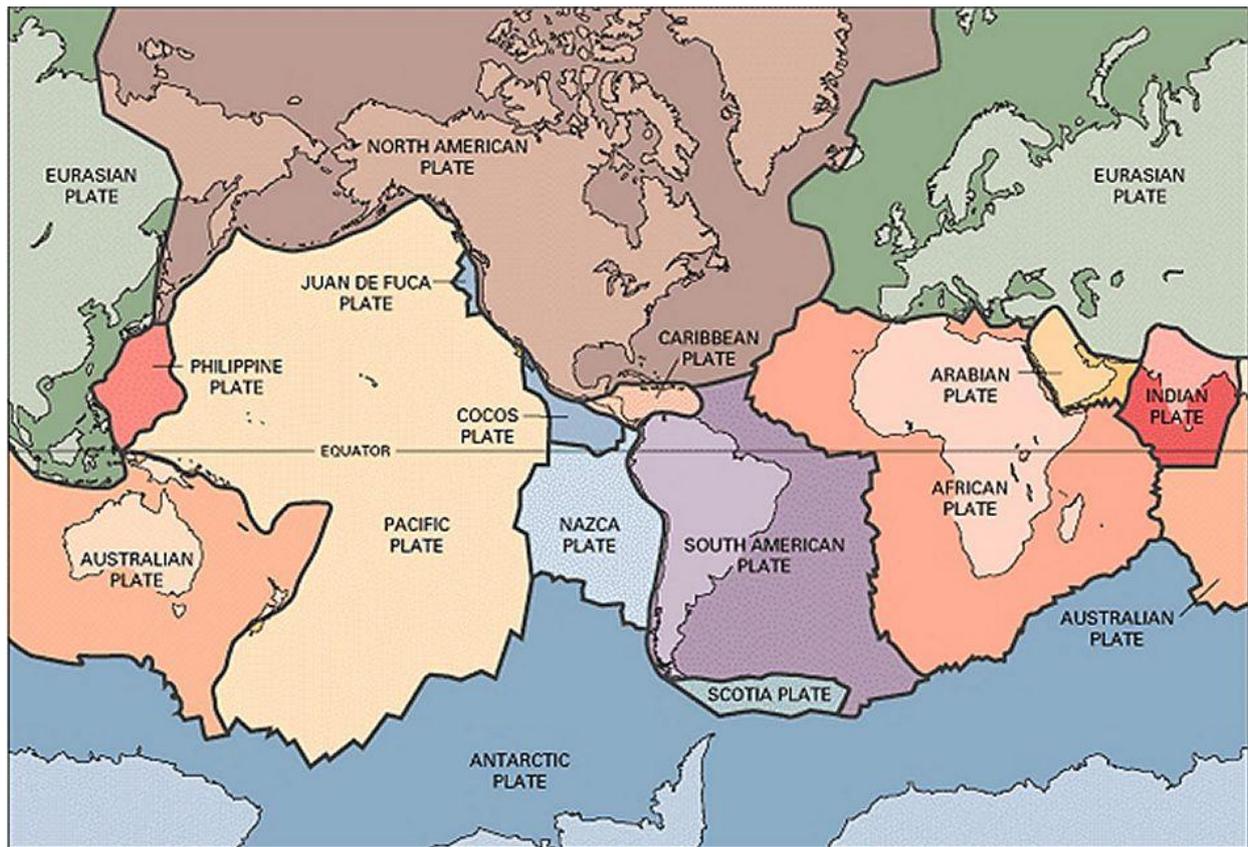
Perspectiva histórica

En términos geológicos, una *placa* es una losa grande y rígida de roca sólida. La palabra *tectónica* proviene de la raíz griega "construir". Juntando estas dos palabras, obtenemos el término *tectónica de placas*, que se refiere a cómo la superficie de la Tierra está formada por placas. La *teoría de la tectónica de placas* establece que la capa más externa de la Tierra está fragmentada en una docena o más de placas grandes y pequeñas que se mueven entre sí mientras viajan sobre material más caliente y móvil.



De acuerdo con la teoría de la deriva continental, el supercontinente Pangea comenzó a dividirse hace unos 225-200 millones de años, fragmentándose eventualmente en los continentes tal como los conocemos hoy. Leyenda: Pérmico, Triásico, Jurásico, Cretaceo, Hoy.

Sin embargo, antes del advenimiento de la tectónica de placas, algunas personas ya consideraban que los continentes actuales eran piezas fragmentadas de grandes masas de tierra preexistentes ("supercontinentes"). Los diagramas a continuación muestran la ruptura del supercontinente Pangea (que significa "todas las tierras" en griego), que ocupó un lugar destacado en la *teoría de la deriva continental*, el precursor de la teoría de la tectónica de placas.



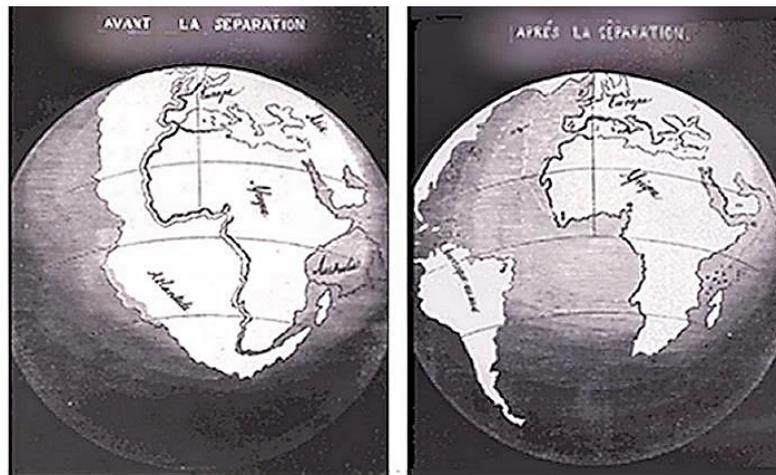
La capa de la Tierra en la que vivimos se divide en una docena de lasas rígidas, llamadas placas tectónicas por los geólogos (plates en la figura), que se mueven entre sí.

La tectónica de placas es un concepto científico relativamente nuevo, introducido hace unos 30 años, pero ha revolucionado nuestra comprensión del planeta dinámico en el que vivimos. La teoría ha unificado el estudio de la Tierra al reunir muchas ramas de las ciencias de la tierra, desde la *paleontología* (el estudio de los fósiles) hasta la *sismología* (el estudio de los terremotos). Ha brindado explicaciones a preguntas sobre las que los científicos habían especulado durante siglos, como por qué los terremotos y las erupciones volcánicas ocurren en áreas muy específicas del mundo, y cómo y por qué se formaron grandes cadenas montañosas como los Alpes y el Himalaya.

¿Por qué la Tierra está tan inquieta? ¿Qué hace que la tierra tiemble violentamente, que los volcanes entren en erupción con fuerza explosiva y que las grandes cadenas montañosas se eleven a alturas increíbles? Científicos, filósofos y teólogos han luchado con preguntas como estas durante siglos. Hasta la década de 1700 la mayoría de los europeos pensaba que un Diluvio bíblico jugó un papel importante en la formación de la superficie de la Tierra. Esta forma de pensar se conocía como "catastrofismo", y la *geología* (el estudio de la Tierra) se basaba en la creencia de que todos los cambios terrestres eran repentinos y provocados por una serie de catástrofes.

Sin embargo, a mediados del siglo XIX, el catastrofismo dio paso al "uniformitarismo", una nueva forma de pensar centrada en el "Principio uniformitario" propuesto en 1785 por James Hutton, un geólogo escocés. Este principio se expresa comúnmente de la siguiente manera: *El presente es la clave del pasado*. Quienes sostienen este punto de vista suponen que las fuerzas y los procesos geológicos, tanto graduales como catastróficos, que actúan sobre la Tierra hoy son los mismos que han

actuado en el pasado geológico.



En 1858, el geógrafo Antonio Snider-Pellegrini hizo estos dos mapas que muestran su versión de cómo los continentes americano y africano pudieron encajar una vez y luego separarse. Izquierda: Los continentes anteriormente unidos antes de su separación. Derecha: Los continentes después de la separación. (Reproducciones de los mapas originales cortesía de la Universidad de Berkeley, California,).

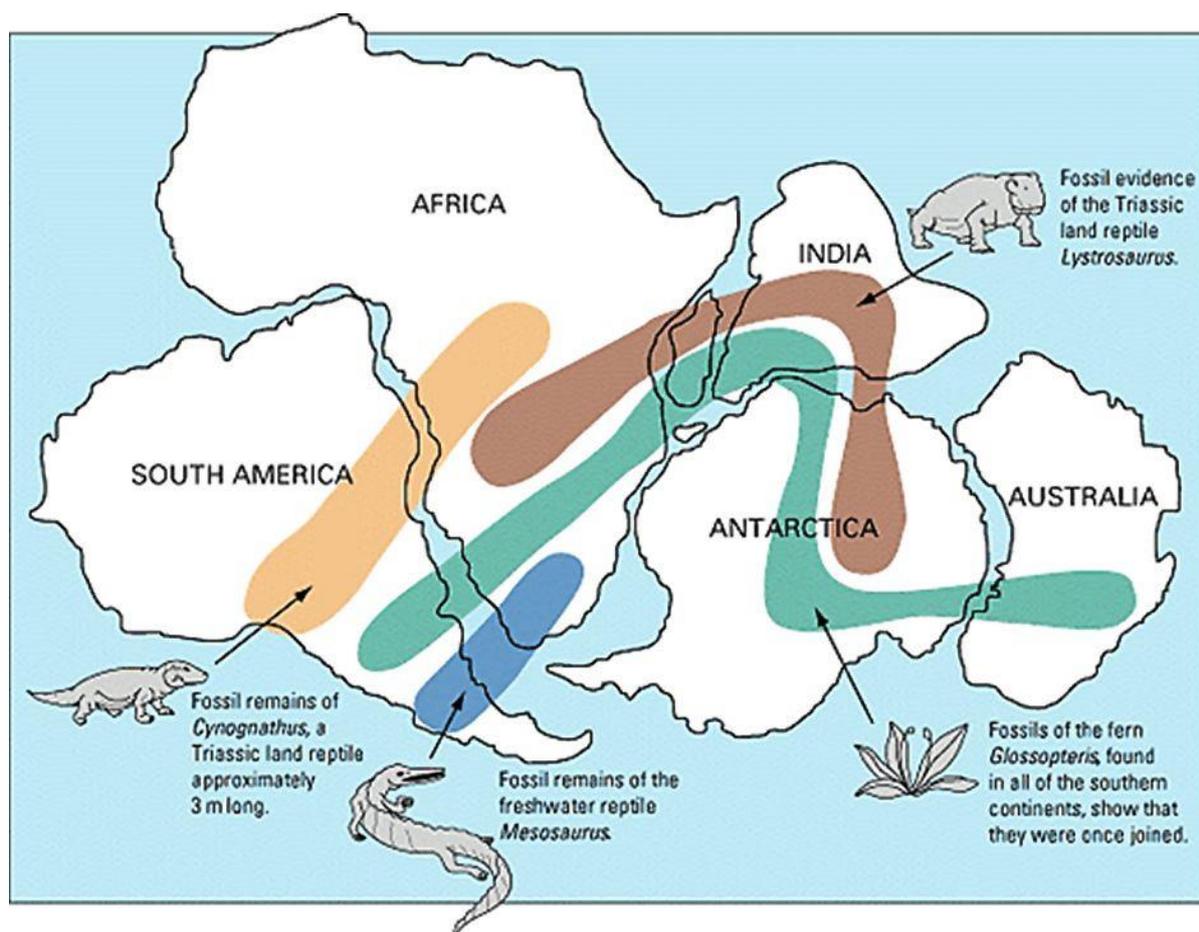
La creencia de que los continentes no siempre han estado fijos en sus posiciones actuales se sospechaba mucho antes del siglo XX; esta noción fue sugerida por primera vez en 1596 por el cartógrafo holandés Abraham Ortelius en su obra *Thesaurus Geographicus*. Ortelius sugirió que las Américas fueron "arrancadas de Europa y África... por terremotos e inundaciones" y continuó diciendo: "Los vestigios de la ruptura se revelan si alguien presenta un mapa del mundo y considera cuidadosamente las costas de los tres [continentes]". La idea de Ortelius volvió a resurgir en el siglo XIX.

Sin embargo, no fue hasta 1912 que la idea de los continentes en movimiento se consideró seriamente como una teoría científica en toda regla, llamada *Deriva continental*, presentada en dos artículos publicados por un meteorólogo alemán de 32 años llamado Alfred Lothar Wegener. Sostuvo que, hace unos 200 millones de años, el supercontinente Pangea comenzó a dividirse. Alexander Du Toit, profesor de geología en la Universidad de Johannesburgo y uno de los partidarios más acérrimos de Wegener, propuso que Pangea primero se dividió en dos grandes masas continentales, *Laurasia* en el hemisferio norte y *Gondwanalandia* en el hemisferio sur. Laurasia y Gondwanaland luego continuaron dividiéndose en los diversos continentes más pequeños que existen en la actualidad.

La teoría de Wegener se basaba en parte en lo que le parecía ser el notable ajuste de los continentes sudamericano y africano, observado por primera vez por Abraham Ortelius tres siglos antes. Wegener también estaba intrigado por la aparición de estructuras geológicas inusuales y de fósiles de plantas y animales encontrados en las costas de América del Sur y África, que ahora están muy separadas por el Océano Atlántico. Razonó que era físicamente imposible para la mayoría de estos organismos haber nadado o haber sido transportados a través de los vastos océanos. Para él, la presencia de especies fósiles idénticas a lo largo de las partes costeras de África y América del Sur era la evidencia más convincente de que los dos continentes alguna vez estuvieron unidos.

En la mente de Wegener, la deriva de los continentes tras la separación de Pangea explicaba no sólo el suceso de la coincidencia de fósiles, sino también la evidencia de los tremendos cambios climáticos en algunos continentes. Por ejemplo, el descubrimiento de fósiles de plantas tropicales (en forma de depósitos de carbón) en la Antártida llevó a la conclusión de que esta tierra congelada debió estar situada anteriormente más cerca del ecuador, en un clima más templado donde podía crecer una vegetación exuberante y pantanosa.

Otros desajustes de geología y clima incluyeron helechos fósiles distintivos (*Glossopteris*) descubiertos en regiones ahora polares, y la aparición de depósitos glaciares en el África árida actual, como el valle del río Vaal en Sudáfrica.



Como señalaron Snider-Pellegrini y Wegener, las ubicaciones de ciertas plantas y animales fósiles en los continentes actuales muy separados formarían patrones definidos (mostrado por las bandas de colores), si los continentes se vuelven a unir. Leyenda (Abajo: Izq) Remanentes fósiles del *Cynognathus*, un reptil terrestre del triásico, de unos 3m de longitud. (Centro) Remanentes fósiles del reptil de agua dulce *Mesosaurus*; (Der) Fósiles de helechos *Glossopteris*, hallados en todos los continentes del sur, demuestran que alguna vez ellos estuvieron unidos. (Arriba) Evidencia fósil del reptil terrestre del triásico *Lystrosaurus*.

La teoría de la deriva continental se convertiría en la chispa que encendió una nueva forma de ver la Tierra. Pero en el momento en que Wegener presentó su teoría, la comunidad científica creía firmemente que los continentes y los océanos eran características permanentes en la superficie de la Tie-

rra. Como era de esperar, su propuesta no fue bien recibida, a pesar de que parecía estar de acuerdo con la información científica disponible en ese momento. Sin embargo, una debilidad fatal de la teoría de Wegener era que no podía responder satisfactoriamente a la pregunta más fundamental planteada por sus críticos: ¿Qué tipo de fuerzas podrían ser lo suficientemente fuertes como para mover masas tan grandes de roca sólida a lo largo de distancias tan grandes? Wegener sugirió que los continentes simplemente atravesaron el fondo del océano, pero Harold Jeffreys, un destacado geofísico inglés, argumentó correctamente que era físicamente imposible que una gran masa de roca sólida atravesara el fondo del océano sin romperse.

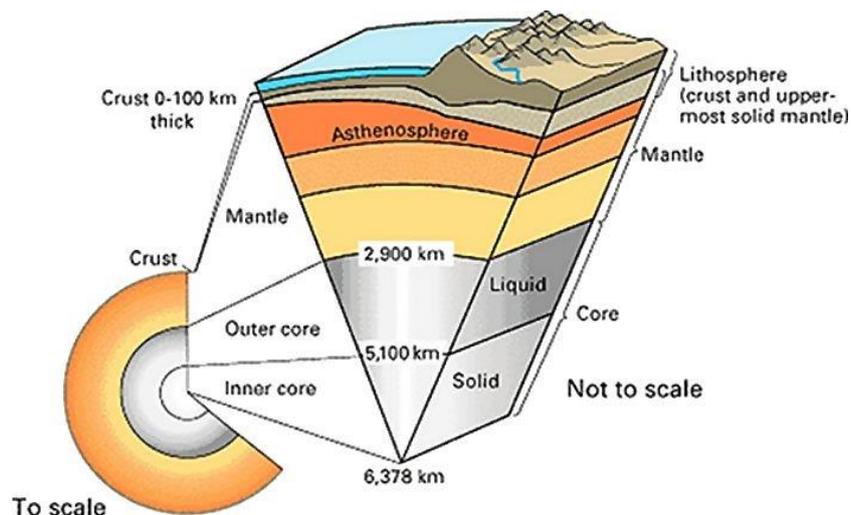
Sin desanimarse por el rechazo, Wegener dedicó el resto de su vida a buscar obstinadamente pruebas adicionales para defender su teoría. Murió congelado en 1930 durante una expedición que cruzaba la capa de hielo de Groenlandia, pero la controversia que generó continuó. Sin embargo, después de su muerte, nueva evidencia de la exploración del suelo oceánico y otros estudios reavivó el interés en la teoría de Wegener, lo que finalmente condujo al desarrollo de la *teoría de la tectónica de placas*.

La tectónica de placas ha demostrado ser tan importante para las ciencias de la tierra como el descubrimiento de la estructura del átomo lo fue para la física y la química, y la teoría de la evolución lo fue para las ciencias de la vida. A pesar de que la teoría de la tectónica de placas ahora es ampliamente aceptada por la comunidad científica, aspectos de la teoría aún se debaten en la actualidad. Irónicamente, una de las principales preguntas pendientes es la que Wegener no pudo resolver: ¿Cuál es la naturaleza de las fuerzas que impulsan las placas? Los científicos también debaten cómo la tectónica de placas pudo haber operado antes (si es que lo hizo) en la historia de la Tierra y si procesos similares operan, o han operado alguna vez, en otros planetas de nuestro sistema solar.

Dentro de la Tierra

El tamaño de la Tierra, de unos 12750 km de diámetro, era conocido por los antiguos griegos, pero no fue hasta principios del siglo XX que los científicos determinaron que nuestro planeta está formado por tres capas principales: *corteza*, *manto* y *núcleo*. Esta estructura en capas se puede comparar con la de un huevo cocido. La *corteza*, la capa más externa, es rígida y muy delgada en comparación con las otras dos. Debajo de los océanos, la corteza varía poco en grosor, extendiéndose generalmente solo unos 5 km. El espesor de la corteza debajo de los continentes es mucho más variable pero tiene un promedio de unos 30 km; bajo grandes cadenas montañosas, como los Alpes o la Sierra Nevada, sin embargo, la base de la corteza puede tener una profundidad de hasta 100 km. Como la cáscara de un huevo, la corteza terrestre es quebradiza y puede romperse.

Debajo de la corteza se encuentra el *manto*, una capa densa y caliente de roca semisólida de aproximadamente 2900 km de espesor. El manto, que contiene más hierro, magnesio y calcio que la corteza, es más caliente y más denso porque la temperatura y la presión dentro de la Tierra aumentan con la profundidad. Como comparación, el manto podría considerarse como la clara de un huevo hervido. En el centro de la Tierra se encuentra el *núcleo*, que es casi el doble de denso que el manto porque su composición es metálica (aleación de hierro y níquel) en lugar de piedra. Sin embargo, a diferencia de la yema de un huevo, el núcleo de la Tierra en realidad se compone de dos partes distintas: un núcleo externo *líquido* de 2200 km de espesor y un núcleo interno *sólido* de 1250 km de espesor. A medida que la Tierra gira, el núcleo externo líquido gira, creando el campo magnético de la Tierra.



Vistas en corte que muestran la estructura interna de la Tierra. Izq.: Esta vista dibujada a escala demuestra que la corteza terrestre tiene literalmente sólo la piel de profundidad. Der: una vista no a escala para mostrar las tres capas principales de la Tierra (corteza, manto y núcleo) con más detalle (ver texto). Leyenda: de izq. a der. Corteza 0-100 km de espesor, astenosfera, Litosfera (corteza + parte superior del manto), Manto, Núcleo externo, Núcleo, Núcleo interno, No a escala, A escala.

No es sorprendente que la estructura interna de la Tierra influya en la tectónica de placas. La parte superior del manto es más fría y rígida que el manto profundo; en muchos sentidos, se comporta como la corteza suprayacente. Juntos forman una capa rígida de roca llamada *litosfera* (del griego *lithos*, piedra). La litosfera tiende a ser más delgada bajo los océanos y en áreas continentales con actividad volcánica, como el oeste de los Estados Unidos.

Con un espesor promedio de al menos 80 km en gran parte de la Tierra, la litosfera se ha fragmentado en las placas móviles que contienen los continentes y océanos del mundo. Los científicos creen que debajo de la litosfera hay una zona móvil relativamente estrecha en el manto llamada *astenosfera* (del griego *asthenes*, débil). Esta zona está compuesta de material semisólido caliente, que puede ablandarse y fluir después de haber sido sometido a altas temperaturas y presiones durante un tiempo geológico. Se cree que la litosfera rígida "flota" o se mueve sobre la astenosfera que fluye lentamente.

¿Qué es una placa tectónica?

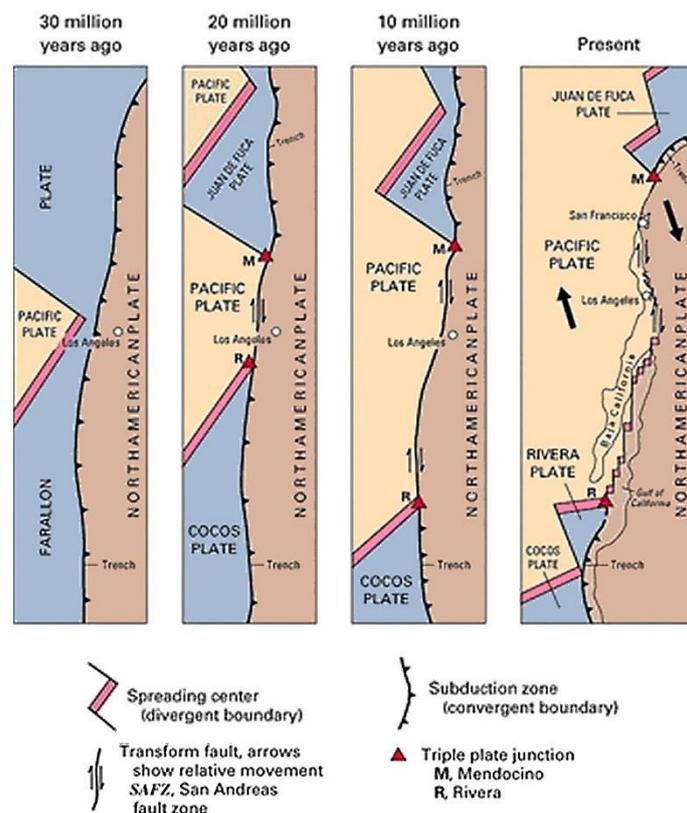
Una placa tectónica (también llamada placa litosférica) es una losa masiva de forma irregular de roca sólida, generalmente compuesta de litosfera, tanto continental como oceánica. El tamaño de la placa puede variar mucho, desde unos pocos cientos hasta miles de kilómetros de ancho; las placas del Pacífico y la Antártida se encuentran entre las más grandes. El espesor de la placa también varía mucho, desde menos de 15 km para la litosfera oceánica joven hasta alrededor de 200 km o más para la litosfera continental antigua (por ejemplo, las partes interiores de América del Norte y del Sur).

¿Cómo flotan estas losas masivas de roca sólida a pesar de su tremendo peso? La respuesta está en la composición de las rocas.

La corteza continental está compuesta por rocas graníticas que están formadas por minerales relativamente livianos como el cuarzo y el feldespato. Por el contrario, la corteza oceánica está compuesta

por rocas basálticas, que son mucho más densas y pesadas. La variación en el espesor de las placas es la manera que tiene la naturaleza de compensar, en parte, el desequilibrio en el peso y la densidad de los dos tipos de corteza. Debido a que las rocas continentales son mucho más livianas, la corteza debajo de los continentes es mucho más gruesa (hasta 100 km), mientras que la corteza debajo de los océanos generalmente tiene solo unos 5 km de espesor. Al igual que los icebergs, de los cuales solo las puntas son visibles sobre el agua, los continentes tienen "raíces" profundas para sustentar sus elevaciones.

La mayoría de las fronteras entre placas individuales no se pueden ver, porque están ocultas bajo a los océanos. Sin embargo, los límites de las placas oceánicas se pueden mapear con precisión desde el espacio exterior mediante mediciones de los satélites GEOSAT. La actividad sísmica y volcánica se concentra cerca de estos límites. Las placas tectónicas probablemente se desarrollaron muy temprano en los 4600 millones de años de historia de la Tierra, y han estado flotando en la superficie desde entonces, como autos chocadores o "carros locos" que se mueven lentamente y se agrupan repetidamente y luego se separan.



Estos cuatro diagramas ilustran el encogimiento de la placa de Farallón, que antes era muy grande, a medida que se consumía progresivamente debajo de las placas de América del Norte y el Caribe, dejando solo las actuales placas de Juan de Fuca, Rivera y Cocos como pequeños remanentes (ver texto). Las flechas sólidas grandes muestran el sentido actual del movimiento relativo entre las placas del Pacífico y de América del Norte. (Modificado del USGS Professional Paper 1515). Leyenda (de izq. a der.) 1) Centro de dispersión (frontera divergente) 2) Región de subducción (frontera convergente) 3) Falla de transformación, las flechas muestran el movimiento relativo SAFZ, región de falla de San Andrés, 4) Unión de tres placas, M: Mendocino, R: Rivera.

Como muchas otras características de la superficie terrestre, las placas cambian con el tiempo. Las compuestas parcial o totalmente por litosfera oceánicas se pueden hundir bajo otra placa, generalmente una placa más ligera, en su mayoría continental, y eventualmente desaparecer por completo. Este proceso está ocurriendo ahora frente a las costas de Oregón y Washington.

La pequeña placa de Juan de Fuca, un remanente de la antigua placa oceánica de Farallón, mucho más grande, algún día se consumirá por completo a medida que continúa hundiéndose debajo de la placa de América del Norte.

Alfred Lothar Wegener: Continentes en movimiento

Quizás la mayor contribución de Alfred Wegener al mundo científico fue su capacidad para entretener hechos aparentemente disímiles y no relacionados en una teoría, notablemente visionaria para la época. Wegener fue uno de los primeros en darse cuenta de que la comprensión de cómo funciona la Tierra requería aportes y conocimientos de *todas* las ciencias de la tierra. La visión científica de Wegener se agudizó en 1914 mientras se recuperaba en un hospital militar de una lesión sufrida como soldado alemán durante la Primera Guerra Mundial. Mientras estaba postrado en cama, tuvo tiempo suficiente para desarrollar una idea que lo había intrigado durante años. Al igual que otros antes que él, Wegener se había quedado impresionado por el notable encaje de las costas de América del Sur y África. Pero, a diferencia de los demás, para apoyar su teoría, Wegener buscó muchas otras líneas de evidencia geológica y paleontológica de que estos dos continentes alguna vez estuvieron unidos.

Durante su larga convalecencia, Wegener pudo desarrollar completamente sus ideas en la *Teoría de la deriva continental*, detallada en un libro titulado *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane* (en alemán, *El origen de los continentes y océanos*) publicado en 1915.



Alfred Lothar Wegener (1880-1930), creador de la teoría de la deriva continental. (Fotografía cortesía del Instituto Alfred Wegener para la Investigación Polar y Marina, Bremerhaven, Alemania).

Wegener obtuvo su doctorado en astronomía planetaria en 1905 pero pronto se interesó en la meteo-

rología; durante su vida participó en varias expediciones meteorológicas a Groenlandia. Tenaz por naturaleza, Wegener pasó gran parte de su vida adulta defendiendo enérgicamente su teoría de la *deriva continental*, que fue duramente atacada desde el principio y nunca obtuvo aceptación durante su vida. A pesar de las abrumadoras críticas de la mayoría de los principales geólogos, que lo consideraban un mero meteorólogo y un extraño que se entrometía en su campo, Wegener no retrocedió, sino que trabajó aún más para fortalecer su teoría.

Un par de años antes de su muerte, Wegener finalmente logró uno de los objetivos de su vida: un puesto académico. Después de una larga pero infructuosa búsqueda de una plaza universitaria en su Alemania natal, aceptó una cátedra en la Universidad de Graz, en Austria. La frustración y el largo retraso de Wegener en obtener una plaza universitaria quizás se debieron a sus amplios intereses científicos. Como señaló Johannes Georgi, amigo y colega de Wegener desde hace mucho tiempo, "Uno escuchaba una y otra vez que lo habían rechazado para un puesto determinado porque también estaba interesado, y quizás en mayor grado, en asuntos que estaban fuera de sus términos de referencia: como si un hombre así no hubiera sido digno de ninguna cátedra en el amplio campo de la ciencia mundial».



Alfred Wegener (izq) y un guía inuit el 1 de noviembre de 1930 durante su última expedición meteorológica en Groenlandia. Esta es una de las últimas fotografías de Wegener, quien murió más tarde durante la expedición (ver texto). (Fotografía cortesía del Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, Alemania).

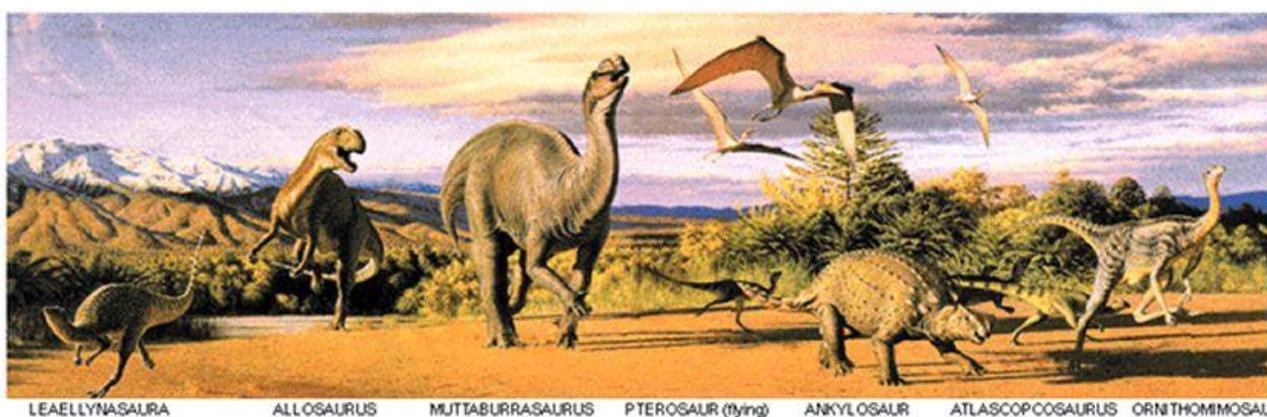
Irónicamente, poco después de lograr su objetivo académico, Wegener murió en una expedición meteorológica a Groenlandia. Georgi le había pedido a Wegener que coordinara una expedición para establecer una estación meteorológica invernal para estudiar la corriente de chorro (trayectoria de tormenta) en la atmósfera superior. Wegener accedió de mala gana. Después de muchos retrasos debido al clima severo, Wegener y otros 14 partieron hacia la estación de invierno en septiembre de 1930 con 15 trineos y 4000 libras de suministros. El frío extremo hizo retroceder a todos menos uno de los 13 groenlandeses, pero Wegener estaba decidido a avanzar hacia la estación, donde sabía que Georgi y los otros investigadores necesitaban desesperadamente los suministros. Viajando en condiciones gélidas, con temperaturas tan bajas como -54°C , Wegener llegó a la estación cinco semanas después. Quiriendo regresar a casa lo antes posible, insistió en emprender el regreso al campamento

base a la mañana siguiente. Pero nunca lo logró; su cuerpo fue encontrado el próximo verano.

Wegener seguía siendo un investigador enérgico y brillante cuando murió a la edad de 50 años. Un año antes de su prematura muerte, se publicó la cuarta edición revisada (1929) de su libro clásico; en esta edición ya había hecho la importante observación de que los océanos menos profundos eran geológicamente más jóvenes. Si no hubiera muerto en 1930, Wegener sin duda se habría abalanzado sobre los nuevos datos batimétricos del Atlántico recién adquiridos por el buque de investigación alemán *Meteor* a fines de la década de 1920. Estos datos mostraron la existencia de un valle central a lo largo de gran parte de la cresta de la dorsal mesoatlántica. Dada su mente fértil, Wegener posiblemente podría haber reconocido la dorsal mesoatlántica poco profunda como un rasgo geológicamente joven resultante de la expansión térmica, y el valle central como una fosa tectónica *resultante* del estiramiento de la corteza oceánica. Desde la corteza joven y estirada en medio del océano hasta la expansión del fondo marino y la tectónica de placas habrían sido pequeños saltos mentales para un gran pensador como Wegener. Este escenario conjetural del Dr. Peter R. Vogt (Laboratorio de Investigación Naval de EE. UU., Washington, DC), un experto reconocido en tectónica de placas, implica que "Wegener probablemente habría sido parte de la revolución de la tectónica de placas, si no el verdadero instigador, si él hubiera vivió más tiempo". En cualquier caso, muchas de las ideas de Wegener sirvieron claramente como catalizador y marco para el desarrollo de la teoría de la tectónica de placas tres décadas después.

¿Dinosaurios polares en Australia?

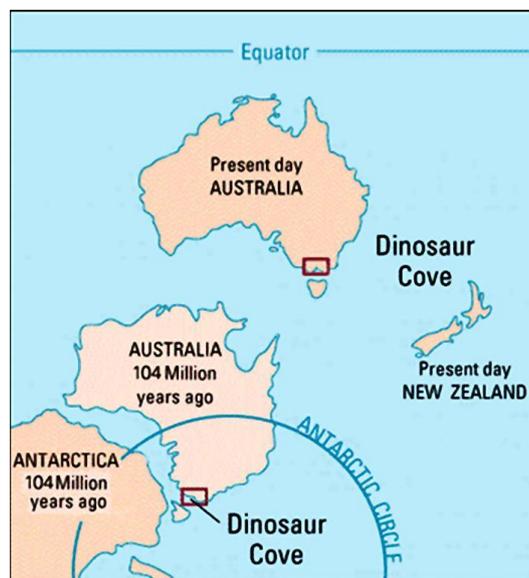
Como meteorólogo, Alfred Wegener estaba fascinado con preguntas como: ¿Por qué los depósitos de carbón, una reliquia de los exuberantes bosques antiguos, se encuentran en la esterilidad helada de la Antártida? ¿Y por qué se encuentran depósitos glaciares en la ahora sofocante África tropical? Wegener razonó que tales anomalías podrían explicarse si estos dos continentes actuales, junto con América del Sur, India y Australia, fueran originalmente parte de un supercontinente que se extendía desde el ecuador hasta el Polo Sur y abarcaba una amplia gama de entornos climáticos y geológicos.



Esta escena, de una minihoja de sellos postales con dinosaurios australianos, muestra algunos de los dinosaurios de sangre caliente que prosperaron en el área de Dinosaur Cove bajo las condiciones climáticas polares que prevalecieron durante el Cretácico Inferior (hace 100 - 125 millones de años) (Ilustración original de Peter Trusler; reproducida con permiso de Australia Post).

La ruptura de Pangea y el posterior movimiento de los continentes individuales a sus posiciones actuales formaron la base de la teoría de la deriva continental de Wegener. Recientemente, los *paleontólogos* (especialistas en estudios de fósiles) han estudiado cuidadosamente algunos restos de dinosaurios bien conservados desenterrados en Dinosaur Cove, en el extremo sureste de Australia continental. Se cree que los dinosaurios que se encuentran en la mayoría de las otras partes del mundo vivieron en regiones templadas o tropicales, pero estas especies australianas, popularmente llamadas dinosaurios "polares", parecían estar bien adaptadas a condiciones de temperatura más frías. Al parecer, tenían una visión nocturna aguda y eran de sangre caliente, lo que les permitía buscar comida durante las largas noches de invierno, a temperaturas bajo cero.

El último de los dinosaurios se extinguió durante un período de fuerte enfriamiento global hacia el final del período Cretácico (hace unos 65 millones de años). Una teoría actual sostiene que el impacto de uno o más grandes cometas o asteroides fue responsable de la tendencia al enfriamiento ("invierno de impacto") que acabó con los dinosaurios; otra teoría atribuye el repentino enfriamiento al cambio climático global provocado por una serie de enormes erupciones volcánicas durante un corto período de tiempo ("invierno volcánico"). El descubrimiento de los dinosaurios polares sugiere claramente que sobrevivieron al invierno volcánico que aparentemente mató a otras especies de dinosaurios. Esto plantea entonces una pregunta intrigante: ¿Por qué se extinguieron si estaban bien adaptados a un clima frío? Los paleontólogos no tienen las respuestas. Independientemente, esta evidencia paleontológica adquirida recientemente demuestra de manera convincente que Australia se ha desplazado hacia el norte, hacia el ecuador, durante los últimos 100 millones de años. En la época en que prosperaron los dinosaurios polares australianos, su hábitat estaba mucho más al sur, bien dentro del círculo polar antártico.



Hace aproximadamente 100 millones de años, el área de Dinosaur Cove (pequeños recuadros rojos) en el extremo sur de Australia estaba bien dentro del círculo polar antártico, más de 40 grados más cerca del Polo Sur que en la actualidad.

En 1991 los paleontólogos descubrieron el *Cryolophosaurus ellioti*, una especie de dinosaurio previamente desconocida y la única encontrada en el continente de la Antártida. Los fósiles de *Cryolophosaurus* se encontraron en el Monte Kirkpatrick, ubicado a solo 600 km del actual Polo Sur. Este dinosaurio carnívoro recién descubierto probablemente era similar en apariencia al *Allosaurus* (ver la obra de arte arriba), excepto por una cresta ósea distintiva en su cabeza, otra especie carnívora que se encuentra en Dinosaur Cove, Australia. Los estudios muestran que el *Cryolophosaurus* vivió hace unos 200 millones de años, cuando la Antártida todavía era parte de Gondwana y tenía un clima similar al del Noroeste del Pacífico, lo suficiente suave como para albergar una gran vida animal herbívora, de la que se alimentaba el *Cryolophosaurus*. Con la ruptura de Gondwana, *Allosaurus* y *Cryolophosaurus* se separaron, mientras Australia se desplazaba hacia el norte, hacia el ecuador, y la Antártida se desplazaba hacia el sur, hacia el Polo Sur.

¡Si los dinosaurios polares australianos y el *Cryolophosaurus* hubieran sido descubiertos mientras estaba vivo, el controvertido Alfred Wegener habría estado encantado!

Desarrollo de la Teoría

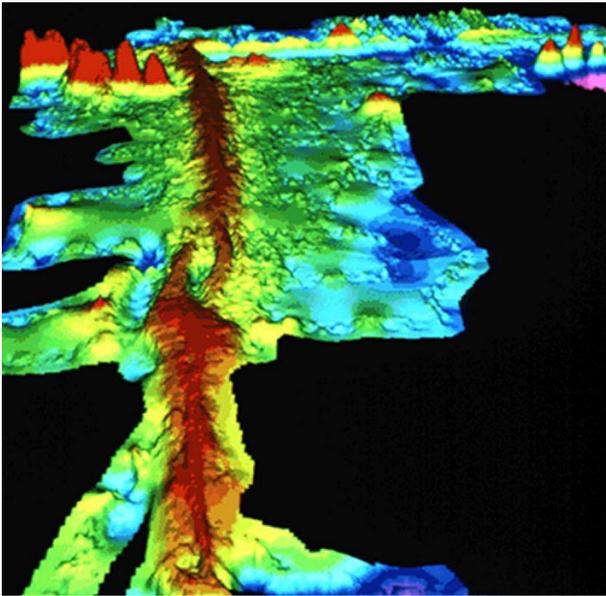
La deriva continental fue debatida acaloradamente durante décadas después de la muerte de Wegener antes de que fuera descartada en gran medida por ser excéntrica, absurda e improbable. Sin embargo, a partir de la década de 1950, surgió una gran cantidad de nueva evidencia para revivir el debate sobre las ideas provocativas de Wegener y sus implicaciones. En particular, cuatro desarrollos científicos importantes estimularon la formulación de la teoría de la tectónica de placas: (1) demostración de la robustez y juventud del suelo oceánico; (2) confirmación de inversiones repetidas del campo magnético de la Tierra en el pasado geológico; (3) el surgimiento de la hipótesis de expansión del fondo marino y el reciclaje asociado de la corteza oceánica; y (4) documentación precisa de que la actividad sísmica y volcánica del mundo se concentra a lo largo de fosas oceánicas y cadenas montañosas submarinas.

Mapeo del suelo oceánico

Alrededor de dos tercios de la superficie de la Tierra se encuentran debajo de los océanos. Antes del siglo XIX, las profundidades del océano abierto eran en gran medida una cuestión de especulación, y la mayoría de la gente pensaba que el fondo del océano era relativamente plano y sin rasgos distintivos. Sin embargo, ya en el siglo XVI, algunos navegantes intrépidos, al tomar sondas con líneas de mano, encontraron que el océano abierto puede diferir considerablemente en profundidad, lo que demuestra que el fondo del océano no era tan plano como generalmente se creía. La exploración oceánica durante los siguientes siglos mejoró espectacularmente nuestro conocimiento del fondo del océano. Ahora sabemos que la mayoría de los procesos geológicos que ocurren en la tierra están relacionados, directa o indirectamente, con la dinámica del suelo oceánico.

Los métodos “modernos” de medición de las profundidades oceánicas se incrementaron en el siglo XIX, cuando los sondeos de línea de aguas profundas (levantamientos *batimétricos*) se hacían de rutina en el Atlántico y el Caribe. En 1855, una carta batimétrica publicada por el teniente de la Marina de los EE. UU. Matthew Maury reveló la primera evidencia de montañas submarinas en el

Atlántico central (al que llamó "Terreno Medio").



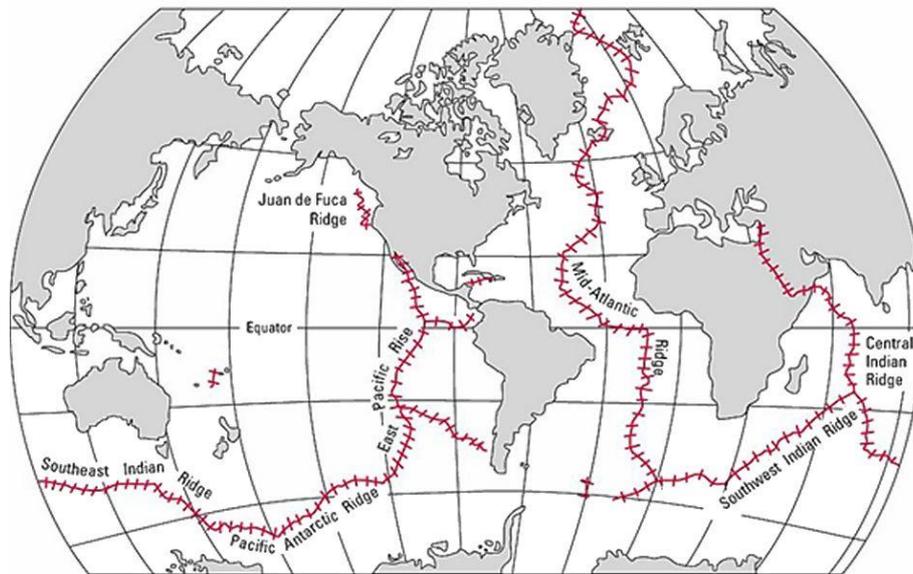
Los colores "cálidos" (de amarillo a rojo) indican la cresta que se eleva sobre el lecho marino, y los colores "fríos" (de verde a azul) representan elevaciones más bajas. Esta imagen (en la latitud 9° norte) es de una pequeña parte de la Dorsal del Pacífico Oriental. (Imágenes cortesía de Stacey Tighe, Universidad de Rhode Island).

Esto fue confirmado más tarde por barcos de inspección que tendían el cable telegráfico transatlántico. Nuestra imagen del fondo del océano se agudizó mucho después de la Primera Guerra Mundial (1914-18), cuando los dispositivos de ecosonda (sistemas de sonar primitivos) comenzaron a medir la profundidad del océano registrando el tiempo que tardaba en emitirse una señal de sonido (comúnmente un "ping" generado eléctricamente) desde el barco hasta rebotar en el fondo del océano y regresar. Los gráficos de tiempo de las señales devueltas revelaron que el fondo del océano era mucho más accidentado de lo que se pensaba anteriormente. Tales mediciones de ecosondeos demostraron claramente la continuidad y rugosidad de la cadena montañosa submarina en el Atlántico central (más tarde llamada *Dorsal del Atlántico Medio*) sugerida por las mediciones batimétricas anteriores.

En 1947 los sismólogos del buque de investigación estadounidense *Atlantis* descubrieron que la capa de sedimentos en el fondo del Atlántico era mucho más delgada de lo que se pensaba originalmente. Los científicos creían previamente que los océanos han existido durante al menos 4 mil millones de años, por lo que la capa de sedimentos debería haber sido muy gruesa. Entonces, ¿por qué había tan poca acumulación de rocas sedimentarias y escombros en el fondo del océano? La respuesta a esta pregunta, que surgió después de una mayor exploración, resultaría ser vital para avanzar en el concepto de tectónica de placas.

En la década de 1950 la exploración oceánica se expandió enormemente. Los datos recopilados por los estudios oceanográficos realizados por muchas naciones llevaron al descubrimiento de que una gran cadena montañosa en el fondo del océano rodeaba virtualmente la Tierra. Llamada la *dorsal oceánica mundial*, esta inmensa cadena montañosa submarina, de más de 50 000 kilómetros (km) de largo y, en algunos lugares, más de 800 km de ancho, zigzaguea entre los continentes, serpenteando alrededor del globo como la costura en un béisbol. Con una altura media de unos 4500 m sobre el fondo del mar, la dorsal oceánica eclipsa todas las montañas de los Estados Unidos excepto el monte McKinley (Denali) en Alaska (6194 m). Aunque está oculto bajo la superficie del océano, el sistema global de dorsales oceánicas es la característica topográfica más destacada de la superficie de nuestro

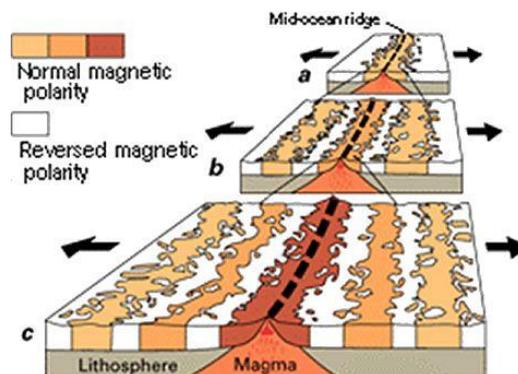
planeta.



La dorsal oceánica (que se muestra en rojo) serpentea entre los continentes como la costura de una pelota de béisbol.

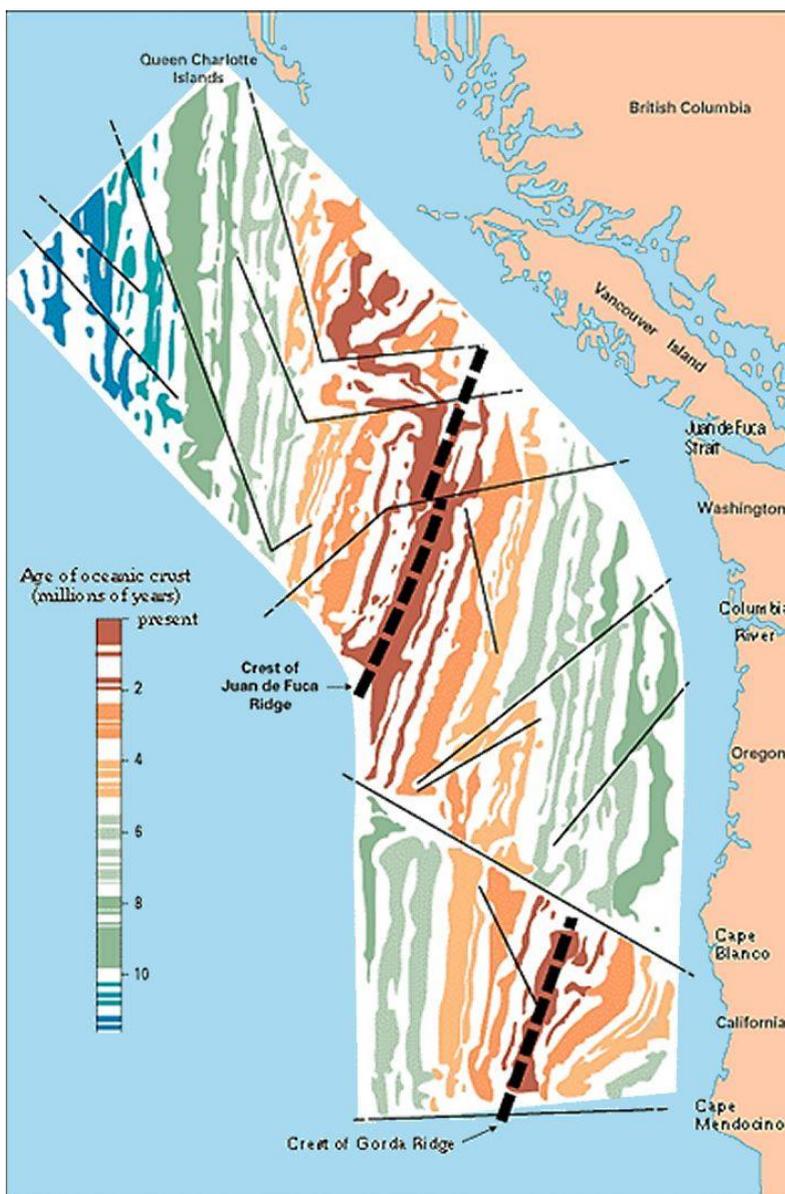
Bandas magnéticas e inversiones polares

A partir de la década de 1950 los científicos, utilizando instrumentos magnéticos (*magnetómetros*) adaptados de dispositivos aerotransportados, desarrollados durante la Segunda Guerra Mundial para detectar submarinos, comenzaron a reconocer variaciones magnéticas extrañas en el fondo del océano. Este hallazgo, aunque inesperado, no fue del todo sorprendente porque se sabía que *el basalto*, la roca volcánica rica en hierro que forma el fondo del océano, contiene un mineral fuertemente magnético (*magnetita*) y puede distorsionar localmente las lecturas de la brújula. Esta distorsión fue reconocida por los marineros islandeses ya a fines del siglo XVIII. Más importante aún, debido a que la presencia de magnetita le da al basalto propiedades magnéticas medibles, estas variaciones magnéticas recién descubiertas proporcionaron otro medio para estudiar el fondo del océano profundo.



Modelo teórico de la formación de bandas magnéticas. La nueva corteza oceánica que se forma continuamente en la cresta de la dorsal oceánica se enfría y envejece cada vez más a medida que se aleja de la cresta de la dorsal con la expansión del fondo marino (ver texto): a. la cresta que se extiende hace unos 5 millones de años; b. hace unos 2 a 3 millones de años; y c. En la actualidad.

A principios del siglo XX *los paleomagnetistas* (aquellos que estudian el campo magnético antiguo de la Tierra), como Bernard Brunhes en Francia (en 1906) y Motonari Matuyama en Japón (en la década de 1920), reconocieron que las rocas generalmente pertenecen a dos grupos según sus propiedades magnéticas. Un grupo tiene la llamada *polaridad normal*, caracterizada porque los minerales magnéticos de la roca tienen la misma polaridad que el campo magnético actual de la Tierra. Esto daría como resultado que el extremo *norte* de la "aguja de la brújula" de la roca apunte hacia *el norte magnético*. El otro grupo, sin embargo, tiene *polaridad invertida*, indicada por una alineación de polaridad opuesta a la del campo magnético actual de la Tierra. En este caso, el extremo *norte* de la aguja de la brújula de la roca apuntaría *al sur*.



La parte central de la figura, que representa el fondo del océano profundo con el mar removido idealmente, muestra las bandas magnéticas (ver texto) mapeadas por estudios oceanográficos en alta mar en el Noroeste del Pacífico. Las líneas negras delgadas muestran fallas de transformación (discutidas más adelante) que desplazan las bandas. Leyenda: (de arriba hacia abajo) Columbia Británica, Isla de Vancouver, Estrecho de Juan de Fuca, Washington, Río Columbia, Oregón, Cabo Blanco, California, Cabo Mendocino, Cresta de Cordillera Gorda, Edad de la corteza oceánica (millones de años), Cresta de la Cordillera Juan de Fuca.

¿Cómo podría ser esto? Esta respuesta se encuentra en la magnetita de la roca volcánica. Los granos de magnetita, que se comportan como pequeños imanes, pueden alinearse con la orientación del campo magnético de la Tierra. Cuando *el magma* (roca fundida que contiene minerales y gases) se

enfriá para formar roca volcánica sólida, la alineación de los granos de magnetita se "fija", registrando la orientación o polaridad magnética de la Tierra (normal o invertida) en el momento del enfriamiento.

A medida que se cartografiaba cada vez más el lecho marino durante la década de 1950, las variaciones magnéticas resultaron no ser ocurrencias aleatorias o aisladas, sino que revelaron patrones reconocibles. Cuando estos patrones magnéticos se mapearon en una amplia región, el fondo del océano mostró un patrón similar al de una cebra. Se colocaron franjas alternas de rocas magnéticamente diferentes en filas a ambos lados de la dorsal oceánica: una franja con polaridad normal y la franja contigua con polaridad invertida. El patrón general, definido por estas bandas alternas de roca con polarización normal e inversa, se conoció como bandas magnéticas.

Expansión del fondo marino y reciclaje de la corteza oceánica

El descubrimiento de las bandas magnéticas naturalmente generó más preguntas: ¿Cómo se forma el patrón de bandas magnéticas? ¿Y por qué las franjas son simétricas alrededor de las crestas de las dorsales oceánicas?

Estas preguntas no podrían responderse sin conocer también el significado de estas crestas.

En 1961 los científicos comenzaron a teorizar que las dorsales en medio del océano marcan zonas estructuralmente débiles donde el fondo del océano se estaba rasgando en dos a lo largo de la cresta de la dorsal. El nuevo magma de las profundidades de la Tierra se eleva fácilmente a través de estas zonas débiles y finalmente entra en erupción a lo largo de la cresta de las dorsales para crear una nueva corteza oceánica. Este proceso, llamado más tarde *expansión del fondo marino*, al operar durante muchos millones de años ha construido el sistema de 50000 km de largo de las dorsales oceánicas.

La hipótesis fue apoyada por varias líneas de evidencia:

- (1) en o cerca de la cresta de la cordillera, las rocas son muy jóvenes y se vuelven progresivamente más viejas alejándose de la cresta de la cordillera;
- (2) las rocas más jóvenes en la cresta de la cordillera siempre tienen la polaridad actual (normal); y
- (3) franjas de roca paralelas a la cresta de la cordillera alternan su polaridad magnética (normal-invertida-normal, etc.), lo que sugiere que el campo magnético de la Tierra ha cambiado muchas veces.

Al explicar tanto las bandas magnéticas con forma de cebra como la construcción del sistema de dorsales en medio del océano, la hipótesis de la expansión del lecho marino rápidamente ganó adeptos y representó otro gran avance en el desarrollo de la teoría de la tectónica de placas. Además, la corteza oceánica ahora llegó a ser apreciada como una "grabación en cinta" natural de la historia de las inversiones en el campo magnético de la Tierra.

La evidencia adicional de la expansión del lecho marino provino de una fuente inesperada: la exploración petrolera. En los años posteriores a la Segunda Guerra Mundial, las reservas continentales de petróleo se estaban agotando rápidamente y la búsqueda de petróleo en alta mar estaba en marcha.

Para llevar a cabo la exploración en alta mar, las compañías petroleras construyeron barcos equipados con una plataforma de perforación especial y la capacidad de transportar muchos kilómetros de tubería de perforación.

Esta idea básica se adaptó más tarde en la construcción de un buque de investigación, llamado *Glomar Challenger*, diseñado específicamente para estudios de geología marina, incluida la recolección de muestras de núcleos de perforación del fondo del océano profundo. En 1968, el barco se embarcó en una expedición científica de un año de duración, atravesando la dorsal mesoatlántica entre América del Sur y África y perforando muestras de núcleos en lugares específicos. Cuando las edades de las muestras fueron determinadas por estudios de datación paleontológica e isotópica, proporcionaron la evidencia concluyente que demostró la hipótesis de la expansión del fondo marino.

Una trascendental consecuencia de la expansión del lecho marino es que se creaba, y se sigue creando, nueva corteza a lo largo de las dorsales oceánicas. Esta idea encontró gran favor entre algunos científicos que afirmaban que el desplazamiento de los continentes puede explicarse simplemente por un gran aumento en el tamaño de la Tierra desde su formación.

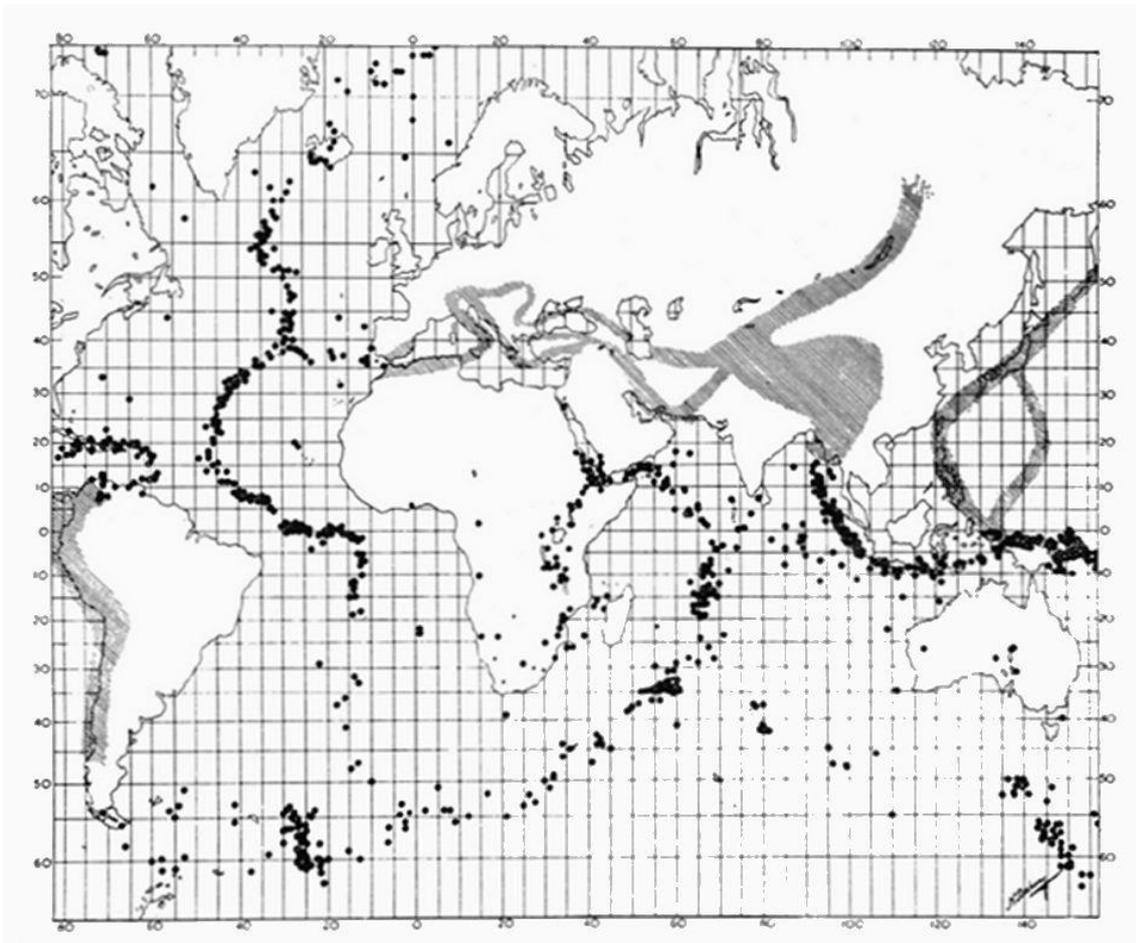


Izq. El *Glomar Challenger* fue el primer buque de investigación diseñado específicamente, a finales de 1960, con el propósito de perforar y tomar muestras de núcleos de las profundidades del fondo oceánico. Der. El *JOIDES Resolution* es el barco de perforación de aguas profundas de la década de 1990 (*JOIDES = Joint Oceanographic Institutions for Deep Earth Sampling*). Este barco, que transporta más de 9000 m de tubería de perforación, es capaz de realizar un posicionamiento más preciso y una perforación más profunda que el *Glomar Challenger*. (Fotografías cortesía del *Ocean Drilling Program, Texas A & M University*).

Sin embargo, esta supuesta hipótesis de la "Tierra en expansión" fue insatisfactoria porque sus defensores no pudieron ofrecer un mecanismo geológico convincente para producir una expansión tan grande y repentina. La mayoría de los geólogos creen que la Tierra ha cambiado poco o nada en tamaño desde su formación hace 4600 millones de años, lo que plantea una pregunta clave: ¿cómo se puede agregar continuamente nueva corteza a lo largo de las dorsales oceánicas sin aumentar el tamaño de la Tierra?

Esta pregunta intrigó particularmente a Harry. H. Hess, geólogo de la Universidad de Princeton y

Contralmirante de la Reserva Naval, y Robert S. Dietz, científico de US Coast and Geodetic Survey, quien fue el primero en acuñar el término *expansión del fondo marino*. Dietz y Hess se encontraban entre los pocos que realmente entendieron las amplias implicaciones de la expansión del fondo marino. Si la corteza de la Tierra se estaba expandiendo a lo largo de las dorsales oceánicas, razonó Hess, debe estar encogiéndose en otros lugares. Sugirió que la nueva corteza oceánica se extendía continuamente alejándose de las dorsales con un movimiento similar al de una cinta transportadora. Muchos millones de años después, la corteza oceánica finalmente desciende a las *fosas oceánicas*, cañones angostos y muy profundos a lo largo del borde de la cuenca del Océano Pacífico. Según Hess, el Océano Atlántico se estaba expandiendo mientras que el Océano Pacífico se estaba encogiendo. A medida que la vieja corteza oceánica se consumía en las fosas, el nuevo magma se elevaba y erupcionaba a lo largo de las dorsales en expansión para formar una nueva corteza. En efecto, las cuencas oceánicas estaban siendo "recicladas" perpetuamente, con la creación de nueva corteza y la destrucción de la vieja litosfera oceánica ocurriendo simultáneamente. Por lo tanto, las ideas de Hess explicaban claramente por qué la Tierra no crece con la expansión del fondo marino, por qué hay tan poca acumulación de sedimentos en el suelo oceánico y por qué las rocas oceánicas son mucho más jóvenes que las rocas continentales.



Ya en la década de 1920, los científicos notaron que los terremotos se concentran en regiones estrechas muy específicas (ver texto). En 1954, el sismólogo francés JP Rothé publicó este mapa que muestra la concentración de terremotos a lo largo de las regiones indicadas por puntos y áreas rayadas. (Ilustración original reproducida con permiso de la Royal Society de Londres).

Concentración de terremotos

Durante el siglo XX, las mejoras en la instrumentación sísmica y un mayor uso de instrumentos de registro de terremotos (*sismógrafos*) en todo el mundo permitieron a los científicos aprender que los terremotos tienden a concentrarse en ciertas áreas, más notablemente a lo largo de las fosas oceánicas y las dorsales expansivas.

A fines de la década de 1920 los sismólogos comenzaron a identificar varias regiones prominentes de terremotos, paralelas a las trincheras, que normalmente tenían una inclinación de 40 a 60° con respecto a la horizontal y se extendían varios cientos de kilómetros hacia el interior de la Tierra.

Estas regiones luego se conocieron como *regiones Wadati-Benioff*, o simplemente *regiones Benioff*, en honor a los sismólogos que las reconocieron por primera vez, Kiyoo Wadati de Japón y Hugo Benioff de los Estados Unidos.

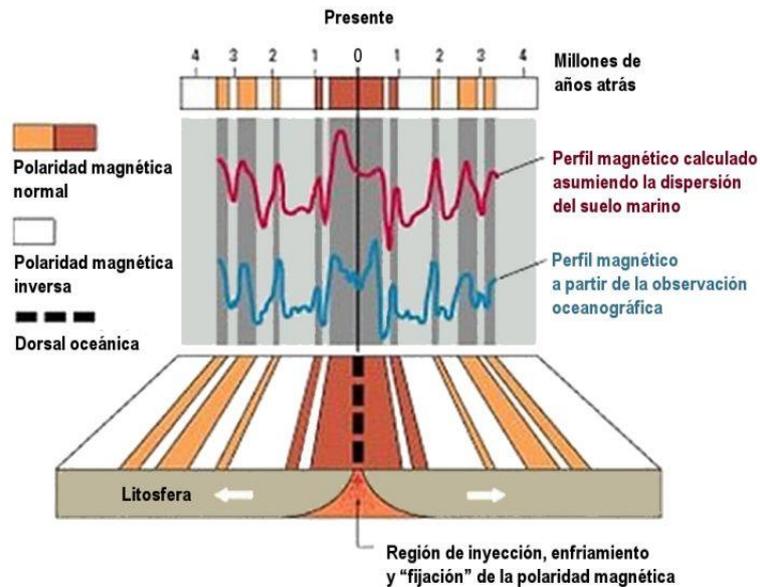
El estudio de la sismicidad global avanzó mucho en la década de 1960 con el establecimiento de la Red mundial de sismógrafos estandarizados (WWSSN) para monitorear el cumplimiento del tratado de 1963 que prohíbe las pruebas de armas nucleares en la superficie. Los datos muy mejorados de los instrumentos WWSSN permitieron a los sismólogos mapear con precisión las regiones de concentración de terremotos en todo el mundo.

Pero, ¿cuál fue el significado de la conexión entre los terremotos y las trincheras y dorsales oceánicas? El reconocimiento de tal conexión ayudó a confirmar la hipótesis de la expansión del lecho marino al identificar las regiones donde Hess había predicho que se estaba generando la corteza oceánica (a lo largo de las dorsales) y las regiones donde la litosfera oceánica se hunde nuevamente en el manto (debajo de las fosas).

Bandas magnéticas y relojes isotópicos

La exploración oceanográfica en la década de 1950 condujo a una mejor comprensión del fondo del océano. Entre los nuevos hallazgos se encuentra el descubrimiento de patrones magnéticos similares a rayas de cebra para las rocas del fondo del océano. Estos patrones no se parecían a los vistos en las rocas continentales. Obviamente, el fondo del océano tenía una historia que contar, pero ¿cual?

En 1962, los científicos de la Oficina Oceanográfica Naval de EE.UU. prepararon un informe que resumía la información disponible sobre las bandas magnéticas asignadas para las rocas volcánicas el suelo oceánico. Después de digerir los datos de este informe junto con otra información, dos jóvenes geólogos británicos, Frederick Vine y Drummond Matthews, y también Lawrence Morley del Servicio Geológico de Canadá, sospecharon que el patrón magnético no era un accidente. En 1963, plantearon la hipótesis de que las rayas magnéticas se producían por inversiones repetidas del campo magnético de la Tierra y no como se pensaba anteriormente, por cambios en la intensidad del campo magnético o por otras causas. Ya se habían demostrado inversiones de campo para rocas magnéticas en los continentes, y el siguiente paso lógico era ver si estas inversiones magnéticas continentales podrían estar correlacionadas en el tiempo geológico con las bandas magnéticas oceánicas. Casi al mismo tiempo que estos emocionantes descubrimientos se hacían en el fondo del océano, también se estaban desarrollando con rapidez nuevas técnicas para determinar las edades geológicas de las rocas (la "datación").



El perfil magnético observado en el suelo oceánico a lo largo de la Dorsal del Pacífico Oriental (azul) coincide bastante bien con el perfil calculado (rojo), basado en las inversiones magnéticas de la Tierra durante los últimos 4 millones de años, y una supuesta velocidad constante de movimiento del suelo oceánico alejándose de un hipotético centro de expansión (abajo). La notable similitud de estos dos perfiles proporcionó uno de los argumentos decisivos en apoyo de la hipótesis de la expansión del fondo marino. La edad de una roca puede "fecharse" midiendo la cantidad total de potasio en la roca, la cantidad de potasio-40 radiactivo restante que no se ha desintegrado y la cantidad de argón-40 (ver texto).

Un equipo de científicos del Servicio Geológico de EE. UU., los geofísicos Allan Cox y Richard Doell y el geoquímico de isótopos Brent Dalrymple reconstruyeron la historia de las inversiones magnéticas durante los últimos 4 millones de años, utilizando una técnica de datación basada en los isótopos de los elementos químicos potasio y argón. La técnica de potasio-argón, como otros "relojes isotópicos", funciona porque ciertos elementos, como el potasio, contienen isótopos radiactivos *inestables* que se descomponen a un ritmo constante durante el tiempo geológico para producir isótopos *hijos*.

La tasa de desintegración se expresa en términos de la "vida media" de un elemento, el tiempo que tarda en desintegrarse la mitad del isótopo radiactivo del elemento. La desintegración del isótopo de potasio radiactivo (potasio-40) produce un isótopo hijo estable (argón-40), que no se descompone más. La edad de una roca puede determinarse ("fecharse") midiendo la cantidad total de potasio en la roca, la cantidad de potasio-40 radiactivo restante que no se ha desintegrado y la cantidad de argón-40. El potasio se encuentra en minerales formadores de rocas comunes, y debido a que el isótopo potasio-40 tiene una vida media de 1310 millones de años, se puede usar para datar rocas de millones de años.

Otros relojes isotópicos de uso común se basan en la desintegración radiactiva de ciertos isótopos de los elementos uranio, torio, estroncio y rubidio. Sin embargo, fue el método de argonación con potasio el que descifró el enigma de las bandas magnéticas en el fondo del océano y proporcionó evidencia convincente para la hipótesis de la expansión del fondo marino. Cox y sus colegas usaron este

método para fechar rocas volcánicas continentales de todo el mundo. También midieron la orientación magnética de estas mismas rocas, lo que les permitió asignar edades a las recientes inversiones magnéticas de la Tierra.

En 1966, Vine y Matthews, y también Morley trabajando de forma independiente, compararon estas edades conocidas de inversiones magnéticas con el patrón de bandas magnéticas que se encuentra en el fondo del océano. Suponiendo que el suelo oceánico se alejara del centro de expansión a un ritmo de varios centímetros por año, descubrieron que había una notable correlación entre las edades de las inversiones magnéticas de la Tierra y el patrón de franjas. Tras su descubrimiento revolucionario, se repitieron estudios similares para otros centros de propagación. Eventualmente, los científicos pudieron datar y correlacionar los patrones de franjas magnéticas de casi todo el fondo del océano, partes del cual tienen una antigüedad de 180 millones de años.

Harry Hammond Hess: La dispersión del lecho marino

Harry Hammond Hess, profesor de geología en la Universidad de Princeton, fue muy influyente en la preparación del escenario para la teoría emergente de la tectónica de placas a principios de la década de 1960. Creía en muchas de las observaciones que Wegener usó para defender su teoría de la deriva continental, pero tenía puntos de vista muy diferentes sobre los movimientos de la Tierra a gran escala.



Harry Hess (1906-1969) con su uniforme de la Marina como Capitán del transporte de asalto Cape Johnson durante la Segunda Guerra Mundial. Después de la guerra, permaneció activo en la Reserva Naval, alcanzando el grado de Contralmirante. (Fotografía cortesía del Departamento de Ciencias Geológicas y Geofísicas de la Universidad de Princeton).

Incluso mientras servía en la Marina de los EE.UU. durante la II Guerra Mundial, Hess estuvo muy interesado en la geología de las cuencas oceánicas. Mientras participaba en los combates en las Marianas, Leyte, Linguayan e Iwo Jima, Hess, con la cooperación de su tripulación, pudo realizar estudios de ecosonda en el Pacífico cuando navegaba de una batalla a la siguiente. Sobre la base del trabajo del geólogo inglés Arthur Holmes en la década de 1930, la investigación de Hess finalmente

resultó en una hipótesis innovadora que más tarde se llamaría *expansión del fondo marino*. En 1959, presentó informalmente esta hipótesis en un manuscrito que circuló ampliamente.

Hess, al igual que Wegener, encontró resistencia porque existían pocos datos del fondo del océano para probar sus ideas. En 1962 estas ideas se publicaron en un artículo titulado "Historia de las cuencas oceánicas", que fue una de las contribuciones más importantes en el desarrollo de la tectónica de placas. En este artículo clásico, Hess describió los conceptos básicos de cómo funciona la expansión del lecho marino: la roca fundida (*magma*) rezuma desde el interior de la Tierra a lo largo de las dorsales oceánicas, creando un nuevo lecho marino que se separa de la cresta de la dorsal activa y, finalmente, se hunde en el fosas oceánicas profundas.

El concepto de Hess de un lecho marino móvil explicaba varias cuestiones geológicas muy desconcertantes. Si los océanos han existido durante al menos 4 mil millones de años, como creían la mayoría de los geólogos, ¿por qué se deposita tan poco sedimento en el fondo del océano? Hess razonó que el sedimento se ha estado acumulando durante unos 300 millones de años como máximo. Este intervalo es aproximadamente el tiempo necesario para que el fondo del océano se mueva desde la cresta de la dorsal hasta las fosas, donde la corteza oceánica desciende a la fosa y se destruye. Mientras tanto, el magma asciende continuamente a lo largo de las dorsales oceánicas, donde el proceso de "reciclado" se completa con la creación de una nueva corteza oceánica. Este reciclaje del lecho marino también explica por qué los fósiles más antiguos encontrados en el lecho marino no tienen más de 180 millones de años. Por el contrario, los fósiles marinos en los estratos rocosos terrestres, algunos de los cuales se encuentran en lo alto del Himalaya, a más de 8500 m sobre el nivel del mar, pueden ser considerablemente más antiguos. Sin embargo, lo más importante es que las ideas de Hess también resolvieron una pregunta que acosaba a la teoría de la deriva continental de Wegener: ¿cómo se mueven los continentes? Wegener tenía una vaga noción de que los continentes simplemente debían "arar" el fondo del océano, lo que sus críticos argumentaron con razón que era físicamente imposible. Con la expansión del fondo marino, los continentes no tenían que empujar a través del fondo del océano sino que eran arrastrados a medida que el fondo del océano se extendía desde las dorsales.

En 1962 Hess estaba bien al tanto de que aún carecía de evidencias sólidas para demostrar su hipótesis y convencer a una comunidad científica más receptiva, pero aun escéptica. La explicación de Vine-Matthew de la formación de bandas magnéticas en el lecho marino un año después, y la exploración oceánica adicional durante los años siguientes, finalmente proporcionaron los argumentos para confirmar el modelo de expansión del lecho marino de Hess. La teoría se fortaleció aún más cuando los estudios de datación mostraron que el lecho marino envejece a medida que se aleja de las crestas de las dorsales. Finalmente, los datos sísmicos mejorados confirmaron que la corteza oceánica se estaba hundiendo en las trincheras, demostrando plenamente la hipótesis de Hess, que se basaba en gran medida en un razonamiento geológico intuitivo. Su idea básica de la expansión del fondo marino a lo largo de las dorsales oceánicas ha resistido bien la prueba del tiempo.

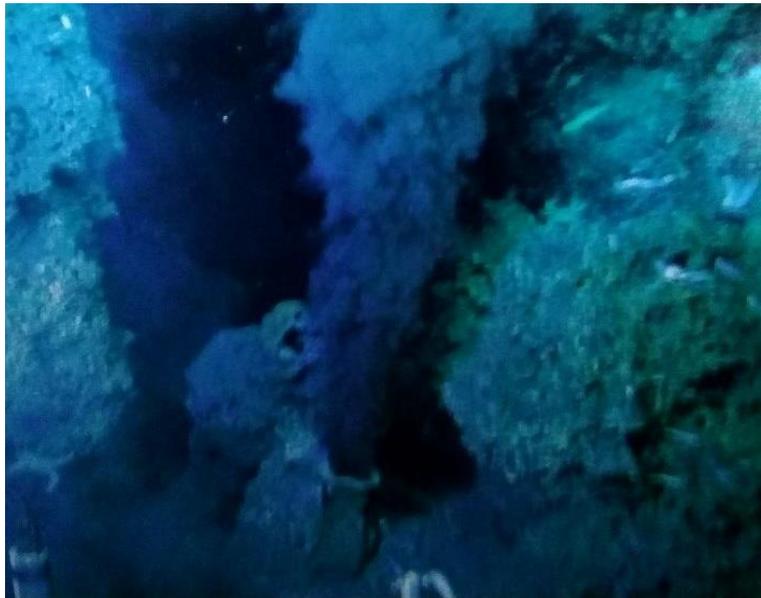
Hess, quien se desempeñó durante años como jefe del Departamento de Geología de Princeton, murió en 1969. A diferencia de Wegener, pudo ver su hipótesis de la expansión del fondo marino en aceptada y confirmada gran medida mientras que el conocimiento del fondo del océano aumentó de forma espectacular durante su vida. Al igual que Wegener, estaba muy interesado en otras ciencias

además de la geología. En reconocimiento a su enorme estatura en todo el mundo, en 1962 Hess, mejor conocido por su investigación geológica, fue designado por el presidente John F. Kennedy para el prestigioso puesto de presidente de la Junta de Ciencias Espaciales de la Academia Nacional de Ciencias. Así, además de ser una fuerza importante en el desarrollo de la tectónica de placas, Hess también desempeñó un papel destacado en el diseño del programa espacial de la nación.

Explorando el suelo profundo del océano: fumarolas y criaturas extrañas

El fondo del océano alberga muchas comunidades únicas de plantas y animales. La mayoría de estos ecosistemas marinos se encuentran cerca de la superficie del agua, como la Gran Barrera de Coral, una formación de coral de 2000 km de largo frente a la costa noreste de Australia. Los arrecifes de coral, como casi todas las comunidades vivas complejas, dependen de la energía solar para su crecimiento (*fotosíntesis*).

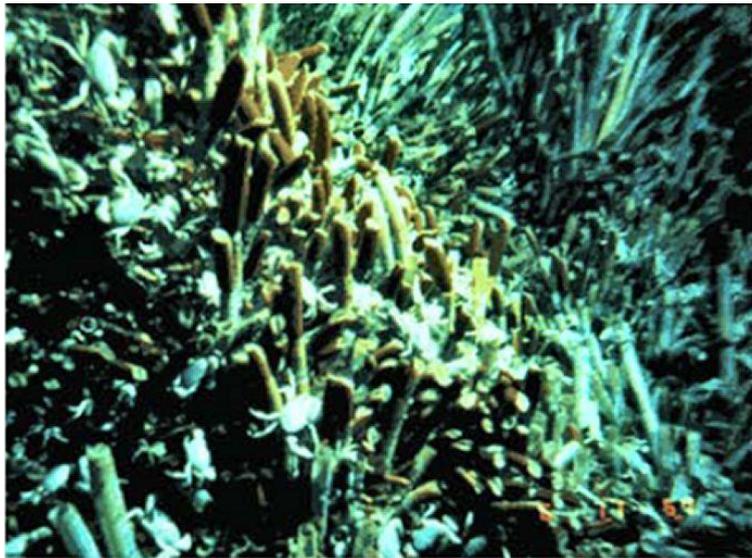
La energía del sol, sin embargo, penetra como máximo sólo unos 300 m por debajo de la superficie del agua. La penetración relativamente superficial de la energía solar y el hundimiento del agua subpolar fría se combinan para hacer que la mayor parte del fondo del océano profundo sea un ambiente gélido con pocas formas de vida.



*Vista del primer respiradero de alta temperatura (380 °C) visto por científicos durante una inmersión del sumergible de aguas profundas Alvin en East Pacific Rise (latitud 21 ° norte) en 1979. Tales respiraderos geotérmicos, llamados **fumarolas hidrotermales** - porque se asemejan a chimeneas - arrojan fluidos oscuros, ricos en minerales, calentados por el contacto con la corteza oceánica recién formada, aún caliente. Esta fotografía muestra una fumarola negra, pero también pueden ser blancas, grises o transparentes según el material que se expulsa. (Fotografía de Dudley Foster de la expedición RISE, cortesía de William R. Normark, USGS).*

En 1977 los científicos descubrieron fuentes termales a una profundidad de 2.5 km en la barrera de las Galápagos, frente a la costa de Ecuador (brecha en expansión). Este emocionante descubrimiento no fue realmente una sorpresa. Desde principios de la década de 1970 los científicos habían predicho que se encontrarían fuentes termales (*respiraderos geotérmicos*) en los centros de expansión activos a lo largo de las dorsales oceánicas, donde el magma, a temperaturas superiores a los 1000 °C, presumiblemente estaba entrando en erupción para formar una nueva corteza oceánica.

Más emocionante, porque fue totalmente inesperado, fue el descubrimiento de abundante e inusual vida marina (gusanos tubulares gigantes, almejas enormes y mejillones) que prosperaban alrededor de las fuentes termales.



El entorno de aguas termales de aguas profundas alberga una vida marina abundante y extraña, incluidos gusanos tubícolas, cangrejos y almejas gigantes. Este "vecindario" de aguas termales se encuentra a 13° N a lo largo de East Pacific Rise. (Fotografía de Richard A. Lutz, Universidad de Rutgers, New Brunswick, Nueva Jersey).

Desde 1977, se han encontrado otras fuentes termales y vida marina asociada en varios sitios a lo largo de las dorsales oceánicas, muchas en East Pacific Rise. Las aguas alrededor de estas fuentes termales en las profundidades del océano, que pueden llegar a los 380 °C, albergan un ecosistema único. Estudios detallados han demostrado que las bacterias oxidantes del sulfuro de hidrógeno, que viven en simbiosis con los organismos más grandes, forman la base de la cadena de alimentación de este ecosistema. El sulfuro de hidrógeno (H₂S, el gas que huele a huevos podridos) que necesitan estas bacterias para vivir está contenido en los gases volcánicos que arrojan las aguas termales. La mayor parte del azufre proviene del interior de la Tierra; una pequeña porción (menos del 15 por ciento) se produce por reacción química del sulfato (SO₄) presente en el agua de mar. Por lo tanto, la fuente de energía que sostiene este ecosistema oceánico profundo no es la luz solar sino la energía de la reacción química (*quimiosíntesis*).



El brazo manipulador del sumergible de investigación Alvin recogiendo una almeja gigante del fondo del océano profundo. (Fotografía de John M. Edmond, Instituto de Tecnología de Massachusetts).

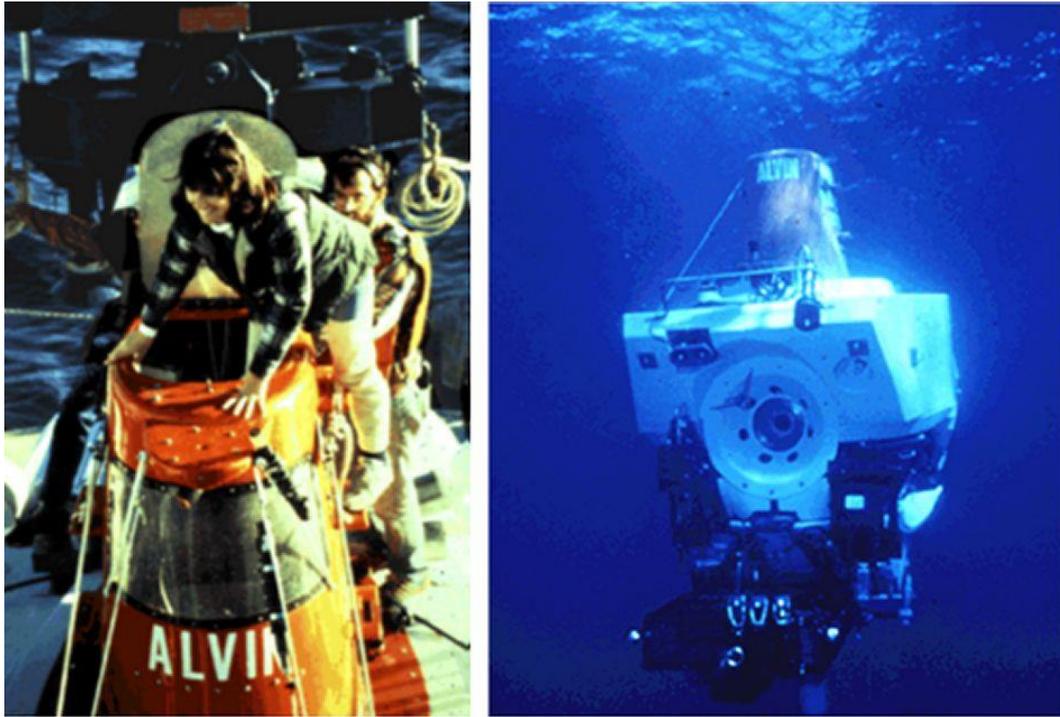


El tamaño de las almejas gigantes de aguas profundas es evidente en las manos de un científico que las sostiene. (Fotografía de William R. Normark, USGS).

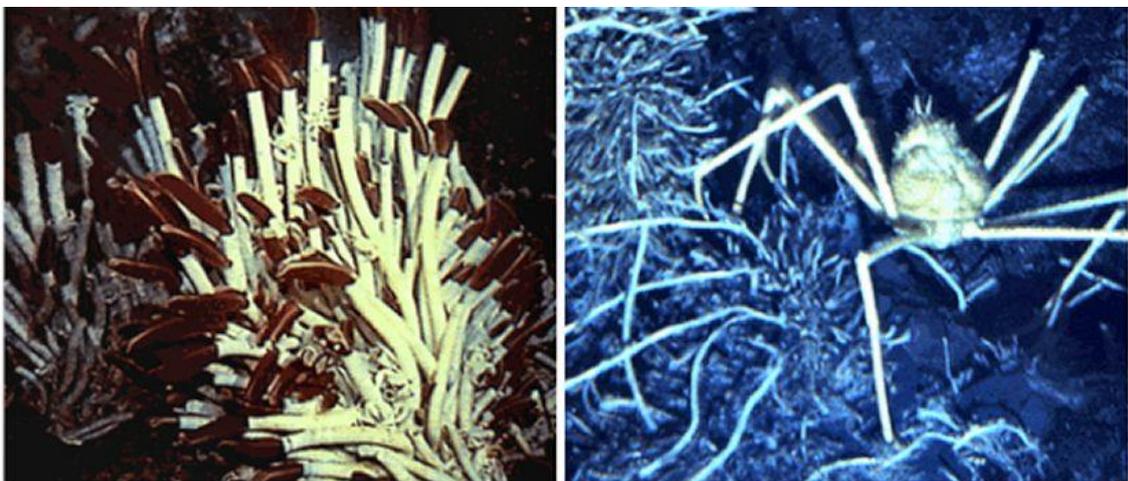
Pero la historia sobre la fuente de energía que sostiene la vida en las profundidades del mar aún se está desarrollando. A fines de la década de 1980, los científicos documentaron la existencia de un brillo tenue en algunos de los respiraderos geotérmicos calientes, que son el objetivo de la actual investigación intensiva. La presencia de luz "natural" en el fondo marino oscuro tiene una gran importancia, porque implica que la fotosíntesis puede ser posible en los respiraderos geotérmicos de aguas profundas. Por lo tanto, la base de la cadena alimenticia del ecosistema de aguas profundas puede comprender bacterias quimiosintéticas y, probablemente en una pequeña proporción, bacterias fotosintéticas.

Los científicos descubrieron los ecosistemas de aguas termales con la ayuda de Alvin, el primer sumergible de aguas profundas del mundo. Construido a principios de la década de 1960 para la Marina de los EE. UU., Alvin es un submarino autopropulsado similar a una cápsula para tres personas, de casi ocho metros de largo. En 1975, los científicos del Proyecto FAMOUS (Estudio submarino franco-estadounidense en el medio del océano) usaron a Alvin para sumergirse en un segmento de la Dorsal del Atlántico Medio, en un intento de hacer la primera observación directa de la expansión del fondo marino. No se observaron aguas termales en esta expedición; fue durante la siguiente expedición de Alvin, la de 1977 a la falla de Galápagos, que se descubrieron las fuentes termales y las extrañas criaturas.

Desde la llegada de Alvin se han construido y utilizado con éxito otros sumergibles tripulados para explorar las profundidades del fondo del océano.



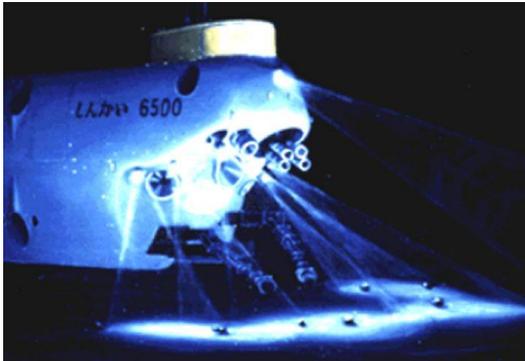
Izq. La investigadora de la USGS Jan Morton entrando en el sumergible Alvin antes de su lanzamiento para una inmersión de investigación. (Fotografía de Randolph A. Koski, USGS). Der. El Alvin debajo del agua después del lanzamiento y en ruta hacia el lecho marino profundo. (Fotografía cortesía de la Institución Oceanográfica Woods Hole).



Izq. Una colonia de gusanos tubulares, algunos de hasta 1,5 m, agrupados alrededor de una fuente termal en el fondo del océano. (Fotografía de Daniel Fornari, Institución Oceanográfica Woods Hole). Der. Primer plano de una centolla que se observó comiendo gusanos tubulares. (Fotografía de William R. Normark, USGS).

Alvin tiene una profundidad máxima operativa de unos 4000 m, más de cuatro veces mayor que la del submarino militar de inmersión más profunda. El Shinkai 6500, un submarino de investigación japonés construido en 1989, puede trabajar a profundidades de hasta 6400 m. Estados Unidos y Ja-

pón están desarrollando sistemas sumergibles de investigación que podrán explorar el lugar más profundo del fondo del océano: la Challenger Deep (la Profundidad Retadora) de 10920 m en el extremo sur de la Fosa de las Islas Marianas.



Bosquejo del Shinkai 6500, un bajel japonés que en la actualidad es el submarino de investigación tripulado de buceo más profundo del mundo. (Cortesía del Centro de Tecnología y Ciencia Marina de Japón).

Comprendiendo el movimiento de las placas

Los científicos tienen ahora una comprensión bastante buena de cómo se mueven las placas y cómo esos movimientos se relacionan con la actividad sísmica. La mayor parte del movimiento ocurre a lo largo de regiones estrechas o fronteras entre las placas, donde los resultados de las fuerzas tectónicas son más evidentes. Hay cuatro tipos de fronteras de placas:

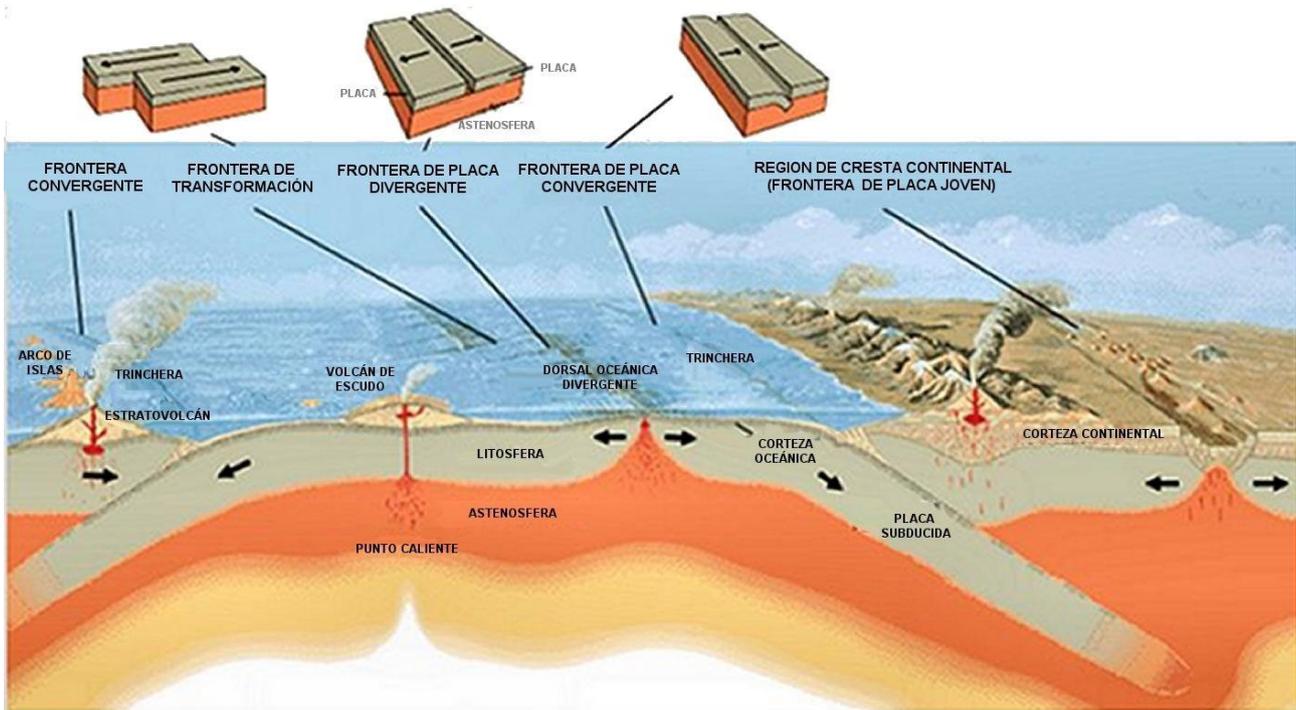
- Fronteras divergentes, donde se genera nueva corteza a medida que las placas se separan.
- Fronteras convergentes, donde la corteza se destruye a medida que una placa se sumerge debajo de otra.
- Fronteras de transformación: donde la corteza no se produce ni se destruye mientras las placas se deslizan horizontalmente una junto a la otra.
- Regiones de frontera entre placas: anchos cinturones donde las fronteras no están bien definidas y no están claros los efectos de la interacción entre placas.

Fronteras divergentes

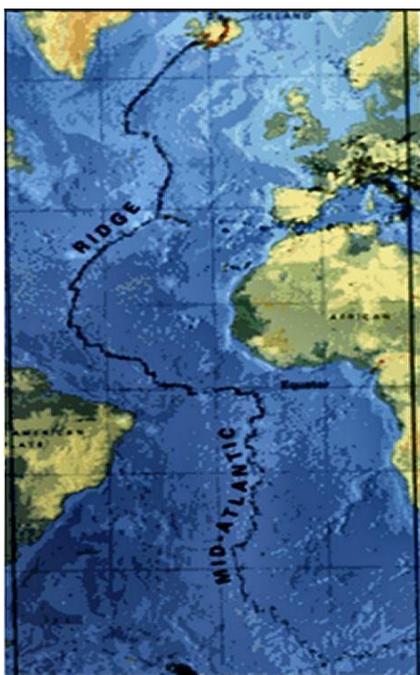
Las fronteras divergentes ocurren a lo largo de los centros de expansión donde las placas se separan y la nueva corteza es creada por el magma, que empuja hacia arriba desde el manto. Imagine dos cintas transportadoras gigantes, una frente a la otra pero moviéndose lentamente en direcciones opuestas, a medida que transportan lejos de la cresta de la cordillera la corteza oceánica recién formada.

Quizás el más conocido de las fronteras divergentes es la Dorsal del Atlántico Medio. Esta cadena montañosa sumergida, que se extiende desde el Océano Ártico hasta más allá del extremo sur de África, es solo un segmento del sistema global de dorsales oceánicas que rodea la Tierra. La tasa de propagación a lo largo de la dorsal mesoatlántica promedia unos 2,5 centímetros por año, o 25 km en un millón de años. Este ritmo puede parecer lento para los estándares humanos, pero debido a que este proceso ha estado ocurriendo durante millones de años, ha resultado en un movimiento de placas de miles de kilómetros. La expansión del lecho marino durante los últimos 100 a 200 millones de

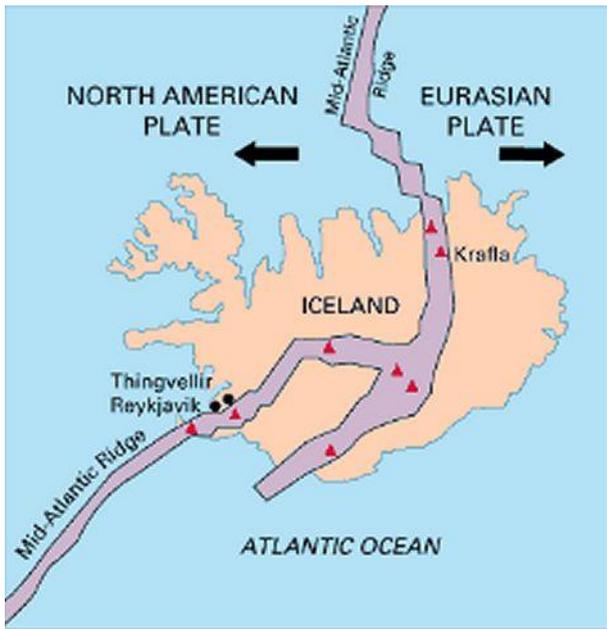
años ha provocado que el Océano Atlántico crezca desde una pequeña entrada de agua entre los continentes de Europa, África y las Américas hasta el vasto océano que existe en la actualidad.



Sección transversal artística que ilustra los principales tipos de fronteras de placa (ver texto); La región costera de África Oriental es un buen ejemplo de región de costera continental. (Sección transversal de José F. Vigil de This Dynamic Planet, un mapa mural producido conjuntamente por el Servicio Geológico de EE. UU., la Institución Smithsonian y el Laboratorio de Investigación Naval de EE. UU.).



La dorsal mesoatlántica, que divide casi todo el Océano Atlántico de norte a sur, es probablemente el ejemplo más conocido y estudiado de una frontera de placas divergentes. (Ilustración adaptada del mapa This Dynamic Planet).



Mapa que muestra la dorsal mesoatlántica que divide Islandia (Iceland) y separa las placas norteamericana y euroasiática. El mapa también muestra Reykjavik, la capital de Islandia, el área de Thingvellir y las ubicaciones de algunos de los volcanes activos de Islandia (triángulos rojos), incluido Krafla.

El país volcánico de Islandia, que se extiende a ambos lados de la Dorsal del Atlántico Medio, ofrece a los científicos un laboratorio natural para estudiar en tierra los procesos que también ocurren a lo largo de las partes sumergidas de una dorsal en expansión. Islandia se está dividiendo a lo largo del centro de expansión entre las placas de América del Norte y Eurasia, a medida que América del Norte se mueve hacia el oeste en relación con Eurasia.

Las consecuencias del movimiento de las placas son fáciles de ver alrededor del volcán Krafla, en la parte nororiental de Islandia. Aquí, las grietas existentes en el suelo se han ensanchado y aparecen otras nuevas cada pocos meses. De 1975 a 1984, se produjeron numerosos episodios de *rifting* (agrietamiento superficial) a lo largo de la región de frontera de Krafla. Algunos de estos eventos de ruptura estuvieron acompañados de actividad volcánica; el suelo se elevaba gradualmente 1-2 m antes de caer abruptamente, indicando una erupción inminente. Entre 1975 y 1984, los desplazamientos provocados por el *rifting* totalizaron unos 7 m.



Fuentes de lava (10 m de altura) brotando de fisuras eruptivas durante la erupción del volcán Krafla en octubre de 1980. (Fotografía de Gudmundur E. Sigvaldason, Instituto Volcanológico Nórdico, Reykjavik, Islandia)

En África Oriental los procesos de expansión ya han separado a Arabia Saudita del resto del continente africano, formando el Mar Rojo. La Placa Africana y la Placa Arábiga, que se dividen activamente, se encuentran en lo que los geólogos llaman un *cruce triple*, donde el Mar Rojo se encuentra con el Golfo de Adén. Es posible que se esté desarrollando un nuevo centro de expansión debajo de África, a lo largo de la Región de Frontera de África Oriental.

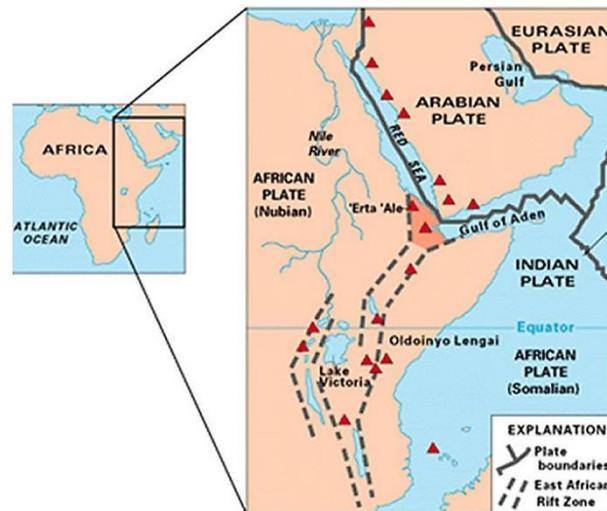


Vista aérea del área alrededor de Thingvellir, Islandia, que muestra una región de frontera (en la sombra) que es una exposición terrestre de la dorsal mesoatlántica. A la izquierda de la frontera, la placa de América del Norte se aleja hacia el oeste de la placa euroasiática (a la derecha de la frontera). Esta fotografía abarca la histórica región turística de Thingvellir, el sitio del primer parlamento de Islandia, llamado Althing, fundado alrededor del año 930 dC. El edificio grande (centro superior) es un hotel para visitantes. (Fotografía de Oddur Sigurdsson, Autoridad Nacional de Energía, Islandia).

Cuando la corteza continental se extiende más allá de sus fronteras comienzan a aparecer grietas de tensión en la superficie de la Tierra. El magma sube y se escurre a través de las grietas que se ensanchan; a veces hace erupción y forma volcanes. El magma ascendente, ya sea que haga erupción o no, ejerce más presión sobre la corteza para producir fracturas adicionales y, en última instancia, la región de frontera.

África oriental puede ser el sitio del próximo gran océano de la Tierra. Las interacciones de las pla-

cas en la región brindan a los científicos la oportunidad de estudiar de primera mano cómo se pudo haber comenzado a formar el Atlántico hace unos 200 millones de años. Los geólogos creen que, si continúa la expansión, las tres placas que se unen en el borde del actual continente africano se separarán por completo, lo que permitirá que el Océano Índico inunde el área y convierta el rincón más oriental de África (el Cuerno de África) en una gran isla.



Mapa de África Oriental que muestra algunos de los volcanes históricamente activos (triángulos rojos) y el Triángulo de Afar (sombreado, centro), lo que se conoce como unión triple (o punto triple), donde tres placas se separan entre sí: la Placa Arábiga y las dos partes de la Placa Africana (la Nubia y la Somalia) dividiéndose a lo largo de la Región de Frontera de África Oriental.

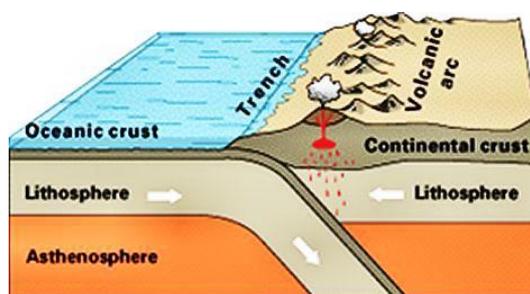


Izq. Vista de helicóptero (febrero 1994) del lago de lava activo dentro del cráter de la cumbre del 'Erta 'Ale (Etiopía), uno de los volcanes activos en la Región de frontera de África Oriental. Dos vulcanólogos con casco y traje rojo, que observan la actividad desde el borde del cráter, proporcionan una escala. El color rojo dentro del cráter muestra dónde la lava fundida está atravesando la corteza negra solidificada del lago de lava. (Fotografía de Jacques Durieux, Groupe Volcans Actifs). Der. Oldoinyo Lengai, otro volcán activo en la Región de frontera de África Oriental, entró en erupción explosivamente en 1966. (Fotografía de Gordon Davies, cortesía de Celia Nyamweru, Universidad de St. Lawrence, Canton, Nueva York).

Fronteras convergentes

El tamaño de la Tierra no ha cambiado significativamente durante los últimos 600 millones de años, y muy probablemente no desde poco después de su formación hace 4600 millones de años. El tamaño invariable de la Tierra implica que la corteza debe destruirse aproximadamente al mismo ritmo que se crea, como supuso Harry Hess. Tal destrucción (reciclado) de la corteza tiene lugar a lo largo de fronteras convergentes donde las placas se mueven unas hacia otras y, a veces, una placa se hunde (subduce) debajo de otra. El lugar donde ocurre el hundimiento de una placa se llama región *de subducción*. El tipo de convergencia, llamada por algunos "colisión" muy lenta, que tiene lugar entre las placas, depende del tipo de litosfera involucrada. La convergencia puede ocurrir entre una placa oceánica y una mayormente continental, o entre dos placas mayoritariamente oceánicas, o entre dos placas mayoritariamente continentales.

Convergencia oceánica-continental



Convergencia oceánica-continental

Si por arte de magia pudiéramos sacar un tapón y drenar el Océano Pacífico, veríamos una vista asombrosa: una serie de *trincheras largas, estrechas y curvas* de miles de kilómetros de largo y de 8 a 10 km de profundidad que se abren en el fondo del océano.

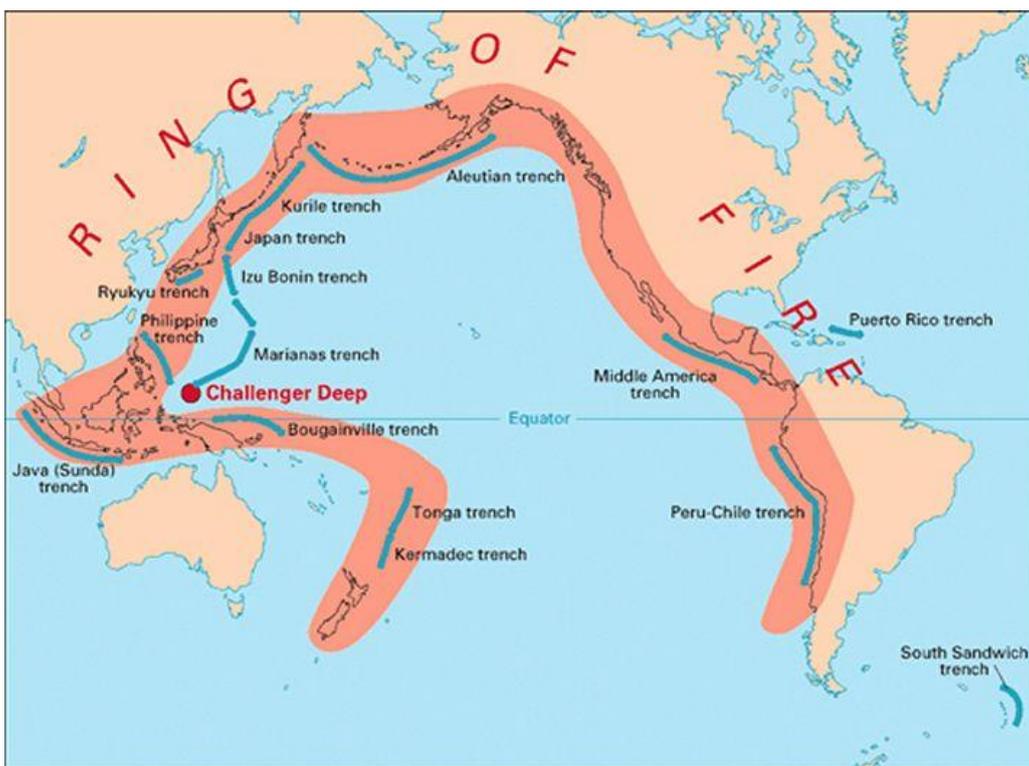
Las trincheras son las partes más profundas del suelo oceánico y se crean por subducción. Frente a la costa de América del Sur, a lo largo de la fosa Perú-Chile, la placa oceánica de Nazca está empujando y siendo subducida bajo la parte continental de la placa sudamericana. A su vez, la Placa Sudamericana dominante se está levantando, creando las imponentes montañas de Los Andes, la columna vertebral del continente.

Los terremotos fuertes y destructivos y el rápido levantamiento de las cadenas montañosas son comunes en esta región. Aunque la Placa de Nazca en su conjunto se está hundiendo suave y continuamente en la fosa, la parte más profunda de la placa en subducción se rompe en pedazos más pequeños que quedan bloqueados en su lugar durante largos períodos de tiempo antes de moverse repentinamente para generar grandes terremotos. Estos terremotos suelen ir acompañados de un levantamiento de la tierra de unos pocos metros.

El 9 de junio de 1994, un terremoto de magnitud 8,3 sacudió unos 320 km al noreste de La Paz, Bolivia, a una profundidad de 636 km. Este terremoto, dentro de la región de subducción entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana, fue uno de los terremotos de subducción más grandes y profundos registrados en América del Sur. Afortunadamente, a pesar de que este poderoso terremoto se sintió tan lejos como Minnesota y Toronto, Canadá, no causó daños mayores debido a su gran profundidad.



La convergencia de las Placas de Nazca y Sudamericana ha deformado y empujado hacia arriba los estratos de piedra caliza para formar imponentes picos de los Andes, como se ve aquí en el área minera de Pachapaqui en Perú. (Fotografía de George Ericksen, USGS).



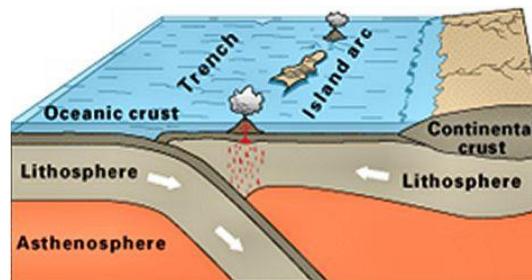
Arcos volcánicos y trincheras oceánicas envolviendo parcialmente la Cuenca del Pacífico, el denominado Anillo de Fuego, región de frecuentes terremotos y erupciones volcánicas. Las trincheras se muestran en azul-verde. Los arcos de islas volcánicas, aunque no están etiquetados, son paralelos a las trincheras y siempre hacia su parte terrestre. Por ejemplo, el arco de islas asociado con la Fosa de las Aleutianas está representado por la larga cadena de volcanes que forman las Islas Aleutianas.

La convergencia oceánica-continental también sustenta muchos de los volcanes activos en la Tierra, como los de los Andes y la Cordillera de las Cascadas, en el noroeste del Pacífico. La actividad eruptiva está claramente asociada con la subducción, pero los científicos debaten vigorosamente las posibles fuentes de magma: ¿el magma es generado por el derretimiento parcial de la losa oceánica subducida, o de la litosfera continental suprayacente, o de ambos?

Convergencia oceánica-oceánica

Al igual que con la convergencia oceánica-continental, cuando dos placas oceánicas convergen, una suele subducirse debajo de la otra, y en el proceso se forma una fosa. La Fosa de las Marianas (paralela a las Islas Marianas), por ejemplo, marca el lugar donde la Placa del Pacífico, que se mueve rápidamente, converge con la Placa de Filipinas, que se mueve más lentamente. El Abismo Retador, en el extremo sur de la Fosa de las Marianas, se hunde más profundamente en el interior de la Tierra (casi 11000 m) que lo que el Monte Everest, la montaña más alta del mundo, se eleva sobre el nivel del mar (aproximadamente 8854 m).

Los procesos de subducción en la convergencia de placas oceánicas también resultan en la formación de volcanes. Durante millones de años, la lava en erupción y los desechos volcánicos se acumulan en el fondo del océano hasta que un volcán submarino se eleva sobre el nivel del mar para formar una isla volcánica. Estos volcanes suelen estar dispuestos en cadenas llamadas *arcos de islas*. Como su nombre lo indica, los arcos de islas volcánicas, que son muy paralelos a las trincheras, generalmente son curvos. Las trincheras son la clave para comprender cómo se han formado los arcos de islas como las Marianas y las Islas Aleutianas y por qué experimentan numerosos terremotos fuertes. Los magmas que forman arcos de islas son producidos por la fusión parcial de la placa descendente y/o la litosfera oceánica suprayacente. La placa descendente también proporciona una fuente de estrés a medida que las dos placas interactúan, lo que provoca frecuentes terremotos de moderados a fuertes.

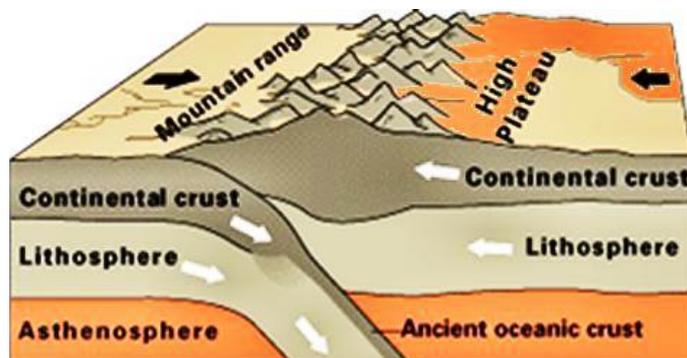


Convergencia oceánica-oceánica

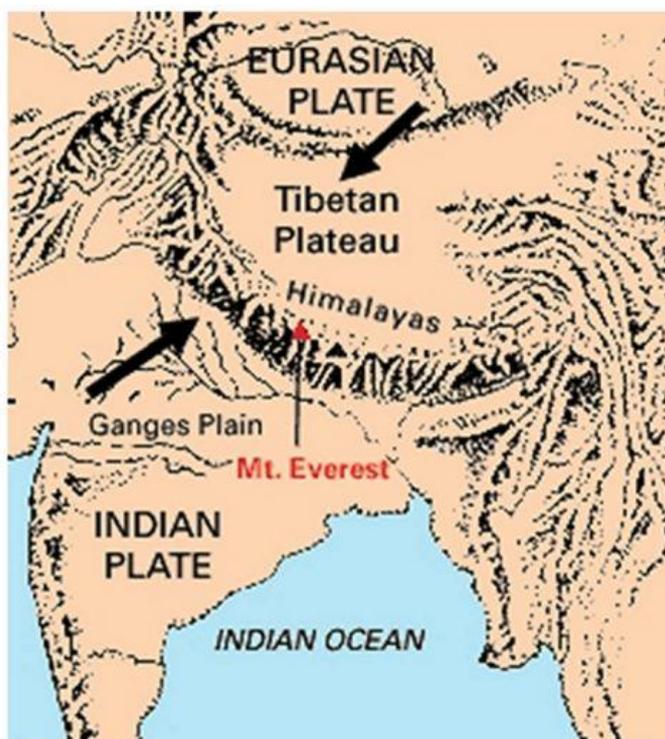
Convergencia continental-continental

La cordillera del Himalaya demuestra de forma espectacular una de las consecuencias más visibles y grandiosas de la tectónica de placas. Cuando dos continentes se encuentran de frente, ninguno se subduce porque las rocas continentales son relativamente livianas y, como dos icebergs que chocan, resisten el movimiento hacia abajo. En cambio, la corteza tiende a combarse y ser empujada hacia arriba o hacia los lados. La colisión de la India con Asia hace 50 millones de años provocó que la placa euroasiática se derrumbara y anulara la placa india. Después de la colisión, la convergencia lenta y continua de las dos placas durante millones de años empujó el Himalaya y la meseta tibetana hasta sus alturas actuales. La mayor parte de este crecimiento ocurrió durante los últimos 10 millones

de años. El Himalaya, con una altura de 8.854 m sobre el nivel del mar, forma las montañas continentales más altas del mundo. Además, la meseta tibetana vecina, a una elevación promedio de unos 4600 m, es más alta que todos los picos de los Alpes excepto el Mont Blanc y el Monte Rosa, y está muy por encima de las cumbres de la mayoría de las montañas de los Estados Unidos.



Convergencia continental-continental

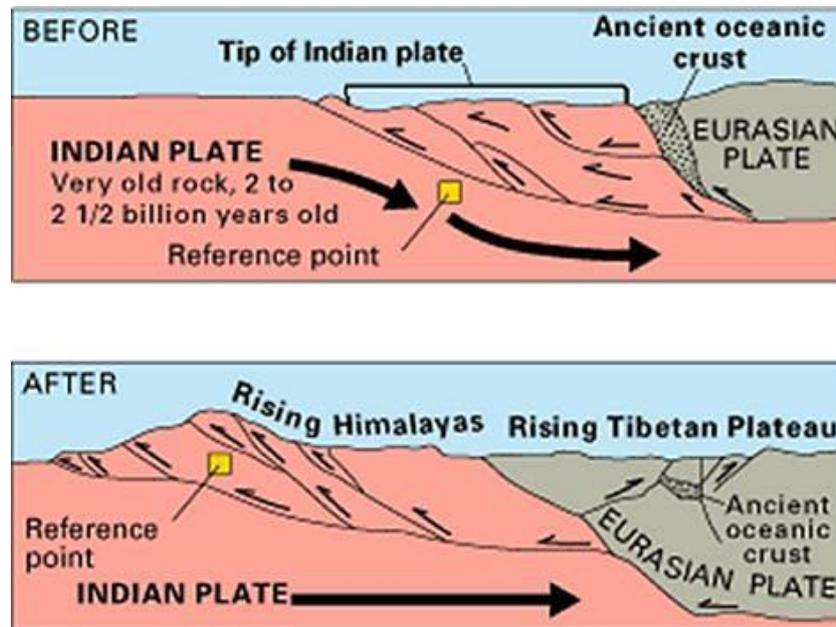


La colisión entre las placas india y euroasiática ha empujado hacia arriba el Himalaya y la meseta tibetana.

El Himalaya: Choque de dos continentes

Entre las creaciones más visibles y espectaculares de las fuerzas de la tectónica de placas se encuentran los elevados Himalayas, que se extienden 2900 km a lo largo de la frontera entre la India y el Tíbet. Esta inmensa cadena montañosa comenzó a formarse hace entre 40 y 50 millones de años, cuando chocaron dos grandes masas de tierra, India y Eurasia, impulsadas por el movimiento de las placas. Debido a que estas dos masas de tierra continentales tienen aproximadamente la misma den-

sidad de roca, una placa no podría subducirse debajo de la otra. La presión de las placas que chocan solo podía aliviarse proyectándose hacia arriba, distorsionando la región de colisión y formando los picos irregulares del Himalaya.



Secciones transversales de dibujos animados que muestran el encuentro de la placa india y la euroasiática antes (before) y después (after) de su colisión. Los puntos de referencia (pequeños cuadrados amarillos) muestran la cantidad de elevación de un punto imaginario en la corteza terrestre durante este proceso de formación de montañas. (Tip: punta).

Hace 225 millones de años, la India era una gran isla situada lejos de la costa australiana, separada de del continente asiático por un vasto océano (llamado el Mar de Tethys). Cuando Pangea se separó hace unos 200 millones de años, la India comenzó a avanzar hacia el norte. Al estudiar la historia, y en última instancia, la desaparición de Tethys, los científicos han reconstruido el viaje hacia el norte de la India.

Hace unos 80 millones de años, la India estaba situada a unos 6400 km al sur del continente asiático, moviéndose hacia el norte a un ritmo de unos 9 m cada 100 de años. Cuando la India embistió a Asia, hace unos 40 a 50 millones de años, su avance hacia el norte se desaceleró aproximadamente a la mitad. Se interpreta que la colisión y la disminución asociada en la tasa de movimiento de las placas marcan el comienzo del rápido levantamiento del Himalaya.

El Himalaya y la meseta tibetana al norte se han elevado muy rápidamente. En solo 50 millones de años, picos como el Monte Everest se han elevado a alturas de más de 9 km. El impacto de las dos masas de tierra aún no ha terminado. Los Himalayas continúan elevándose más de 1 cm al año: ¡una tasa de crecimiento de 10 km en un millón de años! Si es así, ¿por qué los Himalayas no son aún más altos? Los científicos creen que la placa euroasiática ahora puede estar extendiéndose en lugar de empujar hacia arriba, y tal estiramiento resultaría en cierto hundimiento debido a la gravedad.



El viaje de más de 6000 km de la masa terrestre de la India (Placa India) antes de su colisión con Asia (Placa Euroasiática) hace unos 40 a 50 millones de años (ver texto). La India estuvo una vez situada muy al sur del ecuador, cerca del continente de Australia. Leyenda: Placa euroasiática, India hoy, Hace 10 millones de años, Sri Lanka, hace 29 millones de años, Ecuador, Hace 55 millones de años, Océano Índico, Hace 71 millones de años, Masa terrestre "India", Sri Lanka.

Cincuenta kilómetros al norte de Lhasa (la capital del Tíbet), los científicos encontraron capas de arenisca rosa que contienen granos de minerales magnéticos (magnetita) que han registrado el patrón del campo magnético de la Tierra. Estas areniscas también contienen fósiles de plantas y animales que se depositaron cuando el mar de Tethys inundó periódicamente la región. El estudio de estos fósiles ha revelado no sólo su edad geológica sino también el tipo de ambiente y clima en el que se formaron. Por ejemplo, tales estudios indican que los fósiles vivieron en un ambiente relativamente templado y húmedo hace unos 105 millones de años, cuando el Tíbet estaba más cerca del ecuador. Hoy en día el clima del Tíbet es mucho más árido, lo que refleja el levantamiento y el desplazamiento hacia el norte de la región de casi 2000 km. Los fósiles encontrados en las capas de arenisca ofrecen una evidencia espectacular del cambio climático, en la región tibetana, debido al movimiento de las placas durante los últimos 100 millones de años.

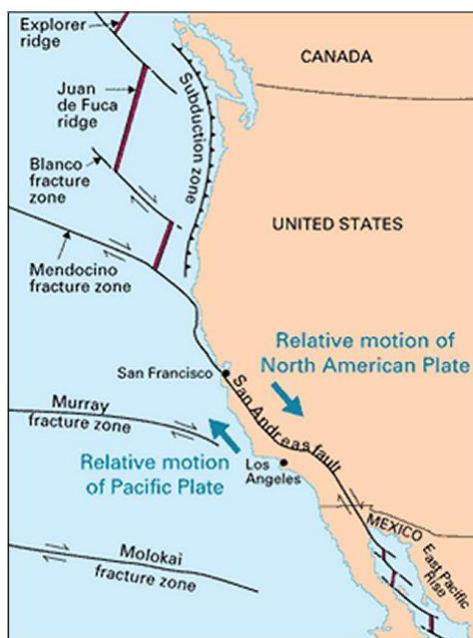
En la actualidad el movimiento de la India continúa ejerciendo una enorme presión sobre el continente asiático; y el Tíbet, a su vez, ejerce presión sobre la masa terrestre hacia el norte que lo está cercandando. El efecto neto de las fuerzas de la tectónica de placas que actúan sobre esta región geológicamente complicada es empujar partes de Asia hacia el este, hacia el Océano Pacífico. Una consecuencia grave de estos procesos es un efecto "dominó" letal: se acumulan tremendas tensiones dentro de la corteza terrestre, que son aliviadas periódicamente por terremotos a lo largo de las numerosas fallas que marcan el paisaje. Algunos de los terremotos más destructivos del mundo en la historia están relacionados con procesos tectónicos continuos, que comenzaron hace unos 50 millones de años cuando los continentes indio y euroasiático se encontraron por primera vez.



Vista del atardecer del imponente monte Everest cubierto de nieve, desde el pueblo de Lobuche (Solukhumbu), Nepal. (Fotografía de Gimmy Park Li).

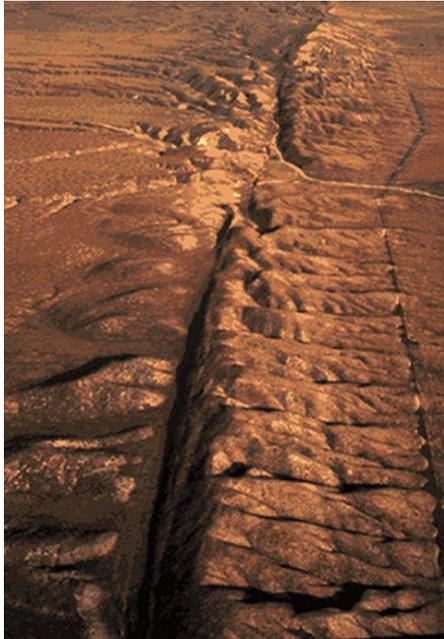
Fronteras de transformación

La región entre dos placas que se deslizan horizontalmente una junto a la otra se denomina *frontera de falla de transformación*, o simplemente *frontera de transformación*. El concepto de fronteras transformantes se originó con el geofísico canadiense J. Tuzo Wilson, quien propuso que estas grandes fallas o *regiones de fractura* conectan dos centros de expansión (fronteras de placas divergentes) o, con menor frecuencia, trincheras (fronteras de placas convergentes). La mayoría de las fallas transformantes se encuentran en el fondo del océano. Por lo general, compensan las crestas de expansión activas, lo que produce márgenes de placas en zigzag, y generalmente se definen por terremotos poco profundos. Sin embargo, algunos ocurren en tierra; por ejemplo, la región de frontera de San Andrés en California. Esta frontera de transformación conecta East Pacific Rise, una frontera divergente hacia el sur, con Gorda Sur - Juan de Fuca – Frontera Exploradora, otra frontera divergente hacia el norte.



Las regiones de fractura de Blanco, Mendocino, Murray y Molokai son algunas de las muchas regiones de fractura (fallas de transformación) que marcan el fondo del océano y compensan las dorsales (ver texto). San Andrés es una de las pocas fallas transformantes expuestas en tierra.

La región de la falla de San Andrés, que tiene unos 1300 km de largo y en algunos lugares decenas de kilómetros de ancho, atraviesa dos tercios de la longitud de California. A lo largo de ella, la Placa del Pacífico ha estado moviéndose horizontalmente más allá de la Placa de América del Norte durante 10 millones de años, a una velocidad promedio de unos 5 cm/año. La tierra en el lado oeste de la región de frontera (en la Placa del Pacífico) se mueve en dirección noroeste en relación con la tierra en el lado este de la región de frontera (en la Placa de América del Norte).



Vista aérea de la falla de San Andrés cortando a través de Carrizo Plain en Temblor Range al este de la ciudad de San Luis Obispo. (Fotografía de Robert E. Wallace, USGS).

Las regiones de fracturas oceánicas son valles en el suelo oceánico que compensan horizontalmente las dorsales en expansión; algunas de estas regiones tienen de cientos a miles de kilómetros de largo y hasta 8 km de profundidad. Los ejemplos de estas grandes cicatrices incluyen las regiones de fractura de Clarion, Molokai y Pioneer en el Pacífico nororiental frente a la costa de California y México. Estas regiones están actualmente inactivas, pero las compensaciones de los patrones de bandas magnéticas proporcionan evidencia de su actividad anterior como fallas de transformación.

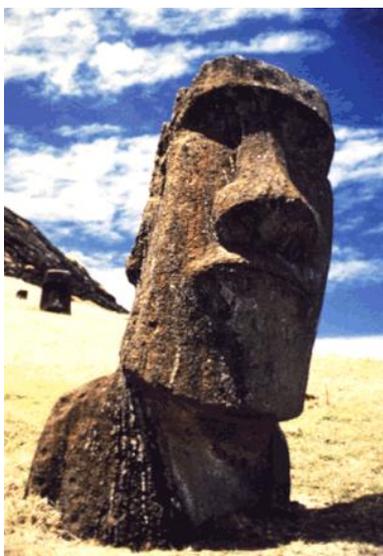
Regiones de frontera de placa

No todas las fronteras de placa son tan simples como los principales tipos discutidos anteriormente. En algunas regiones las fronteras no están bien definidas, porque la deformación del movimiento de las placas que allí ocurre se extiende sobre un ancho cinturón (llamado *región o zona de frontera de placas*). Una de estas zonas marca la región mediterráneo-alpina entre las placas euroasiática y africana, dentro de la cual se han reconocido varios fragmentos de placas más pequeños (*microplacas*). Debido a que las regiones de frontera de placa involucran al menos dos placas grandes y una o más microplacas atrapadas entre ellas, tienden a tener estructuras geológicas y patrones sísmicos complicados.

Velocidad del movimiento

Podemos medir qué tan rápido se mueven las placas tectónicas hoy en día, pero ¿cómo saben los científicos cuáles han sido las velocidades del movimiento de las placas a lo largo del tiempo geológico? Los océanos tienen una de las piezas clave del rompecabezas. Debido a que las bandas magné-

ticas del suelo oceánico registran los cambios en el campo magnético de la Tierra, los científicos, conociendo la duración aproximada de la inversión, pueden calcular la tasa promedio de movimiento de las placas durante un lapso de tiempo dado. Estas velocidades promedio de separación de placa pueden variar ampliamente. La Dorsal Ártica tiene el cambio más lento (menos de 2,5 cm/año), y la Dorsal del Pacífico Oriental, cerca de la Isla de Pascua en el Pacífico Sur, a unos 3400 km al oeste de Chile, tiene la velocidad más rápida (más de 15 cm/año).



Uno de los misteriosos e imponentes monolitos de piedra, algunos de 5 m de altura y con un peso de 14 toneladas, en la Isla de Pascua (Chile), tallados por los antiguos polinesios en roca volcánica. La Isla de Pascua, que se encuentra en la Placa de Nazca cerca de la Dorsal del Pacífico Oriental, se está moviendo hacia el este, hacia América del Sur, al expandirse el lecho marino al ritmo más rápido conocido en el mundo (ver texto). (Fotografía de Carlos Capurro, USEmbassy, Santiago, Chile).

También se puede obtener evidencia de anteriores velocidades del movimiento de placas a partir de estudios de mapeo geológico. Si una formación rocosa de edad conocida, con composición, estructura o fósiles distintivos, mapeada en un lado de la frontera de una placa puede coincidir con la misma formación en el otro lado de la frontera, medir la distancia que la formación ha sido separada puede dar una estimación de la velocidad promedio de la placa. Esta técnica sencilla pero eficaz se ha utilizado para determinar las velocidades de las placas en fronteras divergentes, por ejemplo, la dorsal mesoatlántica, y fronteras de transformación, como la falla de San Andrés.



Izq. Concepción artística de un satélite del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en órbita. (Ilustración cortesía de la NASA). Der. Un receptor terrestre de GPS, instalado en el flanco del volcán Augustine (Cook Inlet, Alaska), que registra las señales enviadas por cuatro o más de los satélites GPS en órbita. (Fotografía de Jerry Svarc, USGS).

El movimiento actual de las placas se puede rastrear directamente por medio de *mediciones geodésicas* basadas en tierra o en el espacio; *la geodesia* es la ciencia del tamaño y la forma de la Tierra. Las mediciones en tierra se toman con técnicas topográficas terrestres, convencionales pero muy precisas, utilizando instrumentos electrónicos láser. Sin embargo, debido a que los movimientos de las placas son de escala global, se miden mejor con métodos basados en satélites. El final de la década de 1970 fue testigo del rápido crecimiento de la *geodesia espacial*, un término aplicado a las técnicas basadas en el espacio para tomar medidas precisas y repetidas de puntos cuidadosamente elegidos en la superficie de la Tierra separados por cientos a miles de kilómetros. Las tres técnicas geodésicas espaciales más comúnmente utilizadas, la interferometría de línea de base muy larga (VLBI), la medición de distancia por láser satelital (SLR) y el Sistema de posicionamiento global (GPS), se basan en tecnologías desarrolladas para la investigación militar y aeroespacial, en particular, la radioastronomía y el seguimiento de satélites.

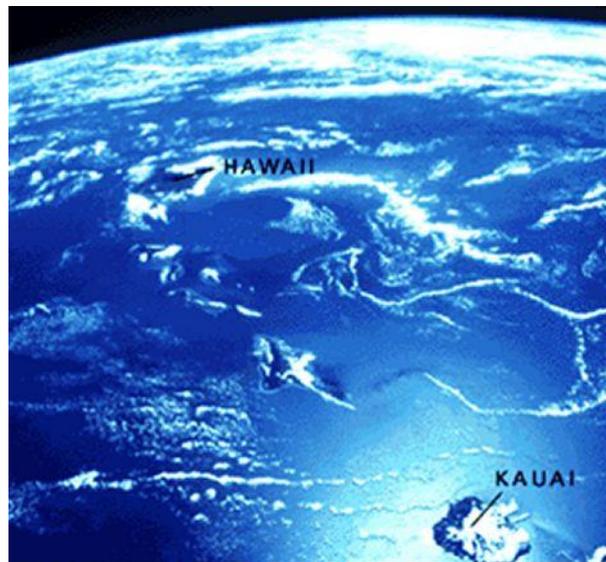
De las tres técnicas, hasta la fecha el GPS ha sido la más útil para estudiar los movimientos de la corteza terrestre. Veintiún satélites se encuentran actualmente en órbita a 20000 km sobre la Tierra como parte del sistema NavStar del Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Estos satélites transmiten continuamente señales de radio a la Tierra. Para determinar su posición precisa en la Tierra (longitud, latitud, elevación), cada sitio terrestre de GPS debe recibir simultáneamente señales de al menos cuatro satélites, registrando la hora y ubicación exactas de cada satélite cuando se recibió su señal. Al medir repetidamente las distancias entre puntos específicos, los geólogos pueden determinar si ha habido un movimiento activo a lo largo de fallas o entre placas. Estas separaciones entre los sitios de GPS ya se miden regularmente alrededor de la cuenca del Pacífico. Al monitorear la interacción entre la placa del Pacífico y las placas circundantes, en gran parte continentales, los científicos esperan aprender más sobre los eventos que conducen a terremotos y erupciones volcánicas en el Anillo de Fuego de Circunvalación del Pacífico. Los datos geodésicos espaciales ya han confirmado que las velocidades y la dirección del movimiento de las placas, promediadas durante varios años, se comparan bien con las velocidades y la dirección del movimiento de las placas promediadas durante millones de años.

“Puntos Calientes”: chimeneas en el manto

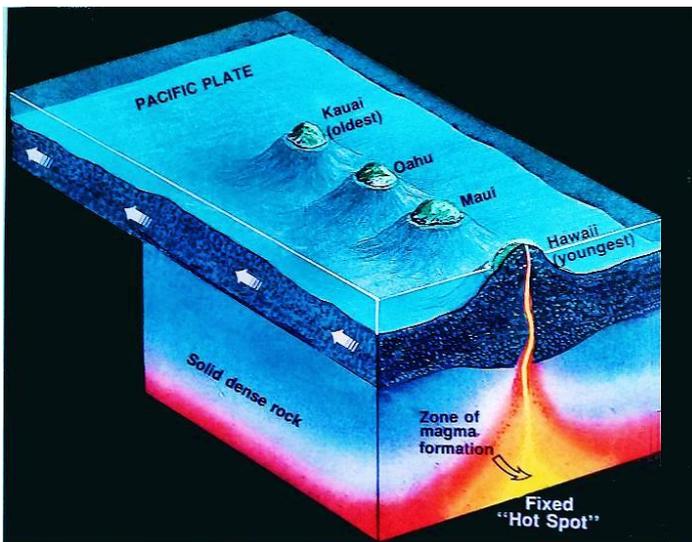
La gran mayoría de los terremotos y erupciones volcánicas ocurren cerca de las fronteras de las placas, pero hay algunas excepciones. Por ejemplo, las Islas Hawai, que son enteramente de origen volcánico, se formaron en medio del Océano Pacífico a más de 3200 km de la frontera de placa más cercano. ¿Cómo encajan las islas hawaianas y otros volcanes que se forman en el interior de las placas en el cuadro de la tectónica de placas?

En 1963, J. Tuzo Wilson, el geofísico canadiense que descubrió las regiones de transformación, tuvo una idea ingeniosa que se conoció como la teoría del "punto caliente". Wilson señaló que en ciertos lugares del mundo, como Hawai, el vulcanismo ha estado activo durante largos períodos de tiempo. Esto solo podría suceder, razonó, si regiones relativamente pequeñas, duraderas y excepcionalmente cálidas, llamadas *puntos calientes*, existieran debajo de las placas que proporcionarían fuentes localizadas de alta energía térmica (*chimeneas*) para sostener el vulcanismo. Específicamente, Wilson planteó la hipótesis de que la forma lineal distintiva de la cadena Islas Hawai - Emperador Seamounts se debió a que la Placa del Pacífico se movió sobre un punto de acceso profundo y esta-

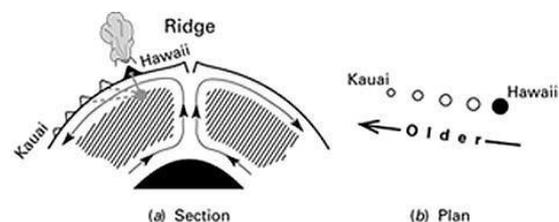
cionario en el manto, ubicado debajo de la posición actual de la Isla Hawai. El calor de este punto caliente produjo una fuente persistente de magma, al derretir parcialmente la Placa del Pacífico que la cubría.



Fotografía del transbordador espacial de las islas de Hawai, la parte más al sur de la larga estela volcánica del "punto caliente hawaiano" (ver texto). Kauai está en la esquina inferior derecha (borde) y la Isla Grande de Hawai en la esquina superior izquierda. Note la curvatura de la Tierra (borde superior). (Fotografía cortesía de la NASA).



◀ Izq: Concepción artística del movimiento de la placa del Pacífico sobre el "punto caliente" fijo de Hawai, que ilustra la formación de la cadena de montes submarinos Hawaiian Ridge-Emperor. (Modificado de un dibujo proporcionado por Maurice Krafft, Centre de Volcanologie, Francia).



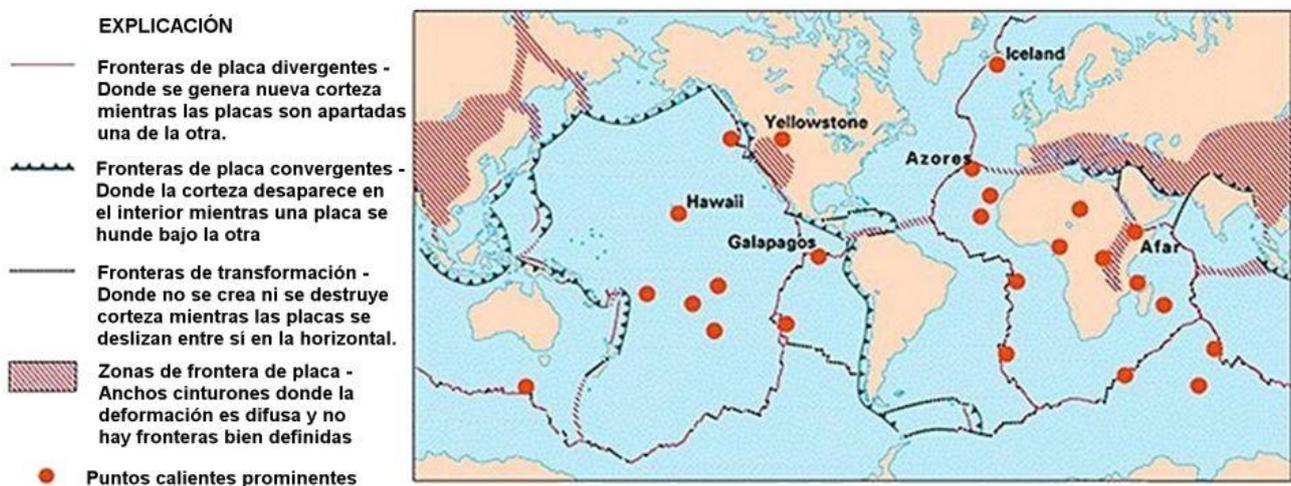
Der: el diagrama original de J. Tuzo Wilson (ligeramente modificado ▲), publicado en 1963, para mostrar su propuesta de origen de las islas hawaianas. (Reproducido con permiso del Canadian Journal of Physics).

El magma, más liviano que la roca sólida circundante, se eleva luego a través del manto y la corteza para entrar en erupción en el lecho marino, formando un monte submarino activo. Con el tiempo, innumerables erupciones hacen que la montaña submarina crezca hasta que finalmente emerge sobre

el nivel del mar para formar un volcán insular. Wilson sugirió que el movimiento continuo de las placas finalmente lleva a la isla más allá del punto de acceso, separándola de la fuente de magma y cesando el vulcanismo. A medida que un volcán de la isla se extingue, otro se desarrolla sobre el punto de acceso y el ciclo se repite. Este proceso de crecimiento y muerte del volcán, durante muchos millones de años, ha dejado un largo rastro de islas volcánicas y montes submarinos a lo largo del fondo del Océano Pacífico.

Según la teoría del punto de acceso de Wilson, los volcanes de la cadena hawaiana deberían envejecer progresivamente y erosionarse más a medida que viajan más allá del punto de acceso. Las rocas volcánicas más antiguas de Kauai, la isla habitada más al noroeste de Hawai, tienen unos 5,5 millones de años y están profundamente erosionadas. En comparación, en la "Isla Grande" de Hawai - la más al sureste de la cadena y presumiblemente aún ubicada sobre el punto de acceso - las rocas expuestas más antiguas tienen menos de 0,7 millones de años y se está formando continuamente nueva roca volcánica.

Los antiguos hawaianos sospecharon la posibilidad de que las islas hawaianas se volvieran más jóvenes hacia el sureste, mucho antes de que se realizaran estudios científicos. Durante sus viajes, los marineros hawaianos notaron las diferencias en la erosión, la formación del suelo y la vegetación y reconocieron que las islas del noroeste (Niihau y Kauai) eran más antiguas que las del sureste (Maui y Hawai).



Mapamundi que muestra las ubicaciones de puntos de acceso destacados seleccionados; los etiquetados se mencionan en el texto. (Modificado del mapa This Dynamic Planet).

Esta idea se transmitió de generación en generación en las leyendas de Pele, la diosa ardiente de los volcanes. Pelé originalmente vivía en Kauai. Cuando la hermana mayor Namakaokahai, la diosa del mar, la atacó, Pele huyó a la isla de Oahu. Cuando Namakaokahai la obligó a huir nuevamente, Pele se mudó al sureste a Maui y finalmente a Hawai, donde ahora vive en el cráter Halemaumau en la cima del volcán Kilauea. El mítico vuelo de Pele de Kauai a Hawai, que alude a la eterna lucha entre el crecimiento de las islas volcánicas a partir de las erupciones y su posterior erosión por las olas del mar, es consistente con la evidencia geológica obtenida siglos después que muestra claramente que las islas se vuelven más jóvenes de noroeste a sureste.

Aunque Hawai es quizás el punto caliente (*chimenea*) más conocido, se cree que existen otros debajo

de los océanos y continentes. Más de cien puntos calientes debajo de la corteza terrestre han estado activos durante los últimos 10 millones de años. La mayoría de estos están ubicados debajo del interior de las placas (por ejemplo, en la Placa Africana), pero algunos ocurren cerca de las fronteras de las placas divergentes. Otros se concentran cerca del sistema de dorsales oceánicas, tal como debajo de Islandia, las Azores y las islas Galápagos. Se cree que existen algunos puntos debajo de la placa de América del Norte. Quizás el más conocido es el que se presume existe bajo la corteza continental en la región del Parque Nacional de Yellowstone, en el noroeste de Wyoming. Aquí hay varias *calderas* (grandes cráteres formados por el colapso del suelo que acompaña al vulcanismo explosivo) que fueron producidas por tres gigantescas erupciones durante los últimos dos millones de años, la más reciente de las cuales ocurrió hace unos 600000 años. Los depósitos de ceniza de estas poderosas erupciones se han mapeado en lugares tan lejanos como Iowa, Missouri, Texas e incluso el norte de México. La energía térmica del presunto punto térmico de Yellowstone alimenta más de 10000 piscinas y manantiales calientes, géiseres (como El Viejo Fiel) y *lodo burbujeante* (piscinas de lodo hirviendo). Un gran cuerpo de magma, coronado por un *sistema hidrotermal* (una región de vapor a presión y agua caliente), aún existe debajo de la caldera. Encuestas recientes demuestran que partes de la región de Yellowstone suben y bajan hasta 1 cm cada año, lo que indica que el área todavía está geológicamente inquieta. Sin embargo, estos movimientos de suelo medibles, que muy probablemente reflejan cambios de presión hidrotérmica, no necesariamente indican una actividad volcánica renovada en el área.

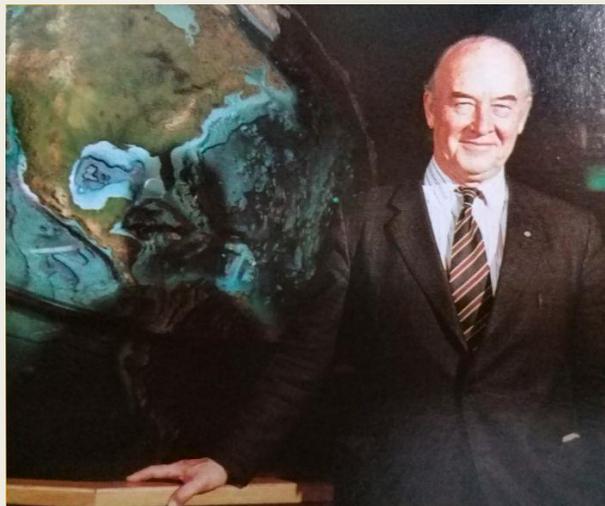


Volcán Mauna Loa cubierto de nieve de 4169 m de altura, Isla Hawai, visto desde el Observatorio de Volcanes de Hawai del USGS. Construida por el vulcanismo del punto caliente de Hawai, Mauna Loa, la montaña más grande del mundo, es un ejemplo clásico de un escudo volcánico. (Fotografía de Robert I. Tilling, USGS).

J. Tuzo Wilson: Descubriendo transformaciones y puntos calientes

El geofísico canadiense J. Tuzo Wilson también fue esencial para el avance de la teoría de la tectónica de placas. Intrigado por la noción de Wegener de una Tierra móvil e influenciado por las emocionantes ideas de Harry Hess, Wilson estaba ansioso por convertir a otros a la revolución que se gestaba en las ciencias de la tierra, a principios de la década de 1960. Wilson había conocido a Hess a fines de la década de 1930, cuando estaba estudiando para su doctorado en la Universidad de Prince-

ton, donde Hess era un joven y dinámico profesor.



J. Tuzo Wilson (1908-1993) hizo importantes contribuciones al desarrollo de la teoría de la tectónica de placas en las décadas de 1960 y 1970. Siguió siendo una fuerza dominante en la escena científica canadiense hasta su muerte. (Fotografía cortesía del Centro de Ciencias de Ontario).

En 1963, Wilson desarrolló un concepto crucial para la teoría de la tectónica de placas. Sugirió que las cadenas de islas volcánicas de Hawái y otras pueden haberse formado debido al movimiento de una placa sobre un "punto caliente" estacionario en el manto. Esta hipótesis eliminó una aparente contradicción con la teoría de la tectónica de placas: la aparición de volcanes activos ubicados a muchos miles de kilómetros de la frontera de placa más cercano.

Cientos de estudios posteriores han demostrado que Wilson tenía razón. Sin embargo, a principios de la década de 1960, su idea se consideró tan radical que su manuscrito "hotspot" fue rechazado por todas las principales revistas científicas internacionales. Este manuscrito finalmente se publicó en 1963 en una publicación relativamente oscura, el *Canadian Journal of Physics*, y se convirtió en un hito en la tectónica de placas.

Otra de las importantes contribuciones de Wilson al desarrollo de la teoría de la tectónica de placas se publicó dos años después. Propuso que debe haber un tercer tipo de frontera de placa para conectar las dorsales y fosas oceánicas, que señaló puede terminar abruptamente y "transformarse" en grandes fallas que se deslizan horizontalmente. Un ejemplo bien conocido de una frontera de falla transformante de este tipo es la región de frontera de San Andrés. A diferencia de las crestas y las trincheras, las fallas transformantes contrarrestan la corteza horizontalmente, sin crearla ni destruirla.

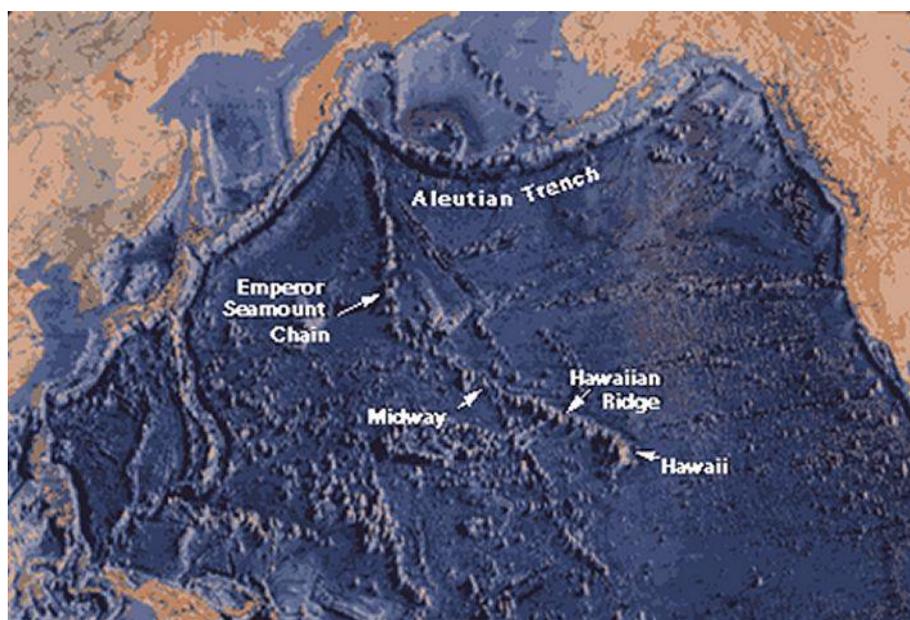
Wilson fue profesor de geofísica en la Universidad de Toronto desde 1946 hasta 1974, cuando se retiró de la docencia y se convirtió en director del Centro de Ciencias de Ontario. Fue un conferenciante y viajero incansable hasta su muerte en 1993. Al igual que Hess, Wilson pudo ver confirmados sus conceptos de puntos calientes y fronteras de transformación, a medida que el conocimiento de la dinámica y la sismicidad del fondo del océano crecía de forma espectacular. Wilson y otros científicos, incluidos Robert Dietz, Harry Hess, Drummond Matthews y Frederick Vine, fueron los arquitectos principales en el desarrollo temprano de la tectónica de placas a mediados de la década de 1960, una teoría que es tan vibrante y emocionante hoy como lo fue cuando comenzó a evolucionar hace

menos de 30 años.

Curiosamente, Wilson tenía cincuenta y tantos años, en la cúspide de su carrera científica, cuando hizo sus perspicaces contribuciones a la teoría de la tectónica de placas. Si Alfred Wegener no hubiera muerto a los 50 años en su mejor momento científico, la revolución de la tectónica de placas podría haber comenzado antes.

El largo rastro del punto caliente de Hawai

Durante los últimos 70 millones de años, los procesos combinados de formación de magma, erupción y crecimiento de volcanes, así como el movimiento continuo de la Placa del Pacífico sobre el "punto caliente" estacionario de Hawai, han dejado un largo rastro de volcanes a lo largo del fondo del Océano Pacífico. La cadena Frontera Hawaiana - Emperador Seamounts se extiende unos 6000 km desde la "Isla Grande" de Hawai hasta la Fosa de las Aleutianas, frente a Alaska. Las propias islas hawaianas son una parte muy pequeña de la cadena y son las islas más jóvenes de la inmensa cadena montañosa, en su mayoría submarina, compuesta por más de 80 volcanes. Sólo la longitud del segmento de la Frontera Hawaiana, desde el noroeste de Big Island hasta Midway Island, es aproximadamente igual a la distancia desde Washington DC hasta Denver, Colorado (2600 km). La cantidad de lava que entró en erupción para formar la cadena Hawai-Emperador se calcula en al menos 750000 kilómetros cúbicos, más que suficiente para cubrir todo el estado de California con una capa de lava de aproximadamente 1,5 km de espesor.



Mapa de parte de la cuenca del Pacífico que muestra el rastro volcánico del punto de acceso de Hawai: la cadena de 6000 km de largo de las montañas submarinas Hawai - Emperador. (Mapa base reimpresso con permiso de World Ocean Floor por Bruce C. Heezen y Marie Tharp, Copyright 1977). Leyenda, de arriba hacia abajo: Trincheras aleutiana; Cadena Emperador Seamount, Midway, Frontera Hawaiana, Hawai.

Un cambio preciso de dirección en la cadena indica que el movimiento de la Placa del Pacífico cam-

bió abruptamente hace unos 43 millones de años, ya que tomó un giro más hacia el oeste desde su anterior dirección hacia el norte. No se sabe por qué la placa del Pacífico cambió de dirección, pero el cambio podría estar relacionado de alguna manera con la colisión de la India con el continente asiático, que comenzó aproximadamente al mismo tiempo.

A medida que la placa del Pacífico continúa moviéndose hacia el oeste–noroeste, la isla de Hawai será llevada más allá del punto caliente por el movimiento de las placas, preparando el escenario para la formación de una nueva isla volcánica en su lugar. De hecho, este proceso puede estar en marcha. El monte submarino Loihi, un volcán submarino activo, se está formando a unos 35 km de la costa sur de Hawái. Loihi ya se ha elevado a unos 3 km sobre el fondo del océano hasta 1 km por debajo de la superficie del océano. Según la teoría del punto caliente, suponiendo que Loihi siga creciendo, se convertirá en la próxima isla de la cadena hawaiana. En el futuro geológico, Loihi puede eventualmente fusionarse con la Isla de Hawái, que a su vez está compuesta por cinco volcanes entretrejidados: Kohala, Mauna Kea, Hualalai, Mauna Loa y Kilauea.

Algunas preguntas aún sin respuesta

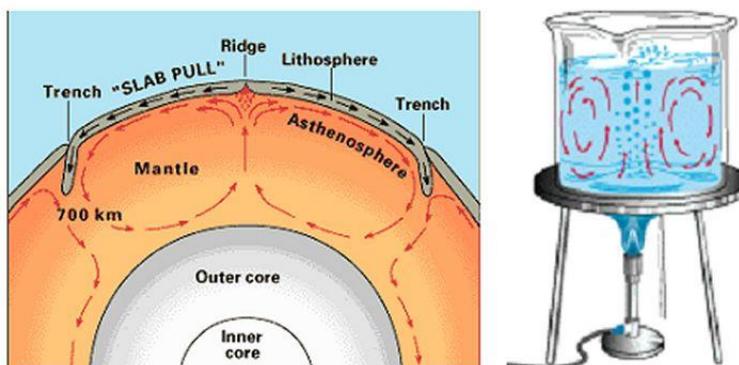
Las placas no se desplazan al azar ni vagan por la superficie de la Tierra; son impulsadas por fuerzas definidas pero invisibles. Aunque los científicos no pueden describirlas con precisión ni comprenderlas completamente, la mayoría cree que las fuerzas relativamente superficiales que impulsan las placas litosféricas se combinan con fuerzas que se originan mucho más profundamente en la Tierra.

¿Qué mueve las placas?

A partir de pruebas sísmicas y geofísicas y experimentos de laboratorio, por lo general los científicos están de acuerdo con la teoría de Harry Hess, la fuerza impulsora de las placas es el movimiento lento del manto caliente y blando que se encuentra debajo de las placas rígidas. Esta idea fue considerada por primera vez en la década de 1930 por Arthur Holmes, el geólogo inglés que más tarde influyó en el pensamiento de Harry Hess sobre la expansión del fondo marino. Holmes especuló que el movimiento circular del manto transportaba los continentes de la misma manera que una cinta transportadora. Sin embargo, en el momento en que Wegener propuso su teoría de la deriva continental, la mayoría de los científicos todavía creían que la Tierra era un cuerpo sólido e inmóvil. Ahora sabemos más. Como J. Tuzo Wilson declaró elocuentemente en 1968, "La tierra, en lugar de aparecer como una estatua inerte, es una cosa viva y móvil". Tanto la superficie de la Tierra **como** su interior están en movimiento. Debajo de las placas litosféricas, a cierta profundidad, el manto está parcialmente fundido y puede fluir, aunque lentamente, en respuesta a fuerzas constantes aplicadas durante largos períodos de tiempo. Así como un metal sólido como el acero, cuando se expone al calor y la presión, puede ablandarse y tomar diferentes formas, también puede hacerlo la roca sólida en el manto cuando se somete al calor y la presión en el interior de la Tierra durante millones de años.

Se cree que la roca móvil debajo de las placas rígidas se mueve de manera circular, algo así como una olla de sopa espesa cuando se calienta hasta hervir. La sopa caliente sube a la superficie, se esparce y comienza a enfriarse, y luego vuelve a hundirse hasta el fondo de la olla donde se recalienta y sube nuevamente. Este ciclo se repite una y otra vez para generar lo que los científicos llaman *corriente de convección* o *flujo convectivo*. Si bien el flujo convectivo se puede observar fácilmente en una olla de sopa hirviendo, la idea de que un proceso de este tipo agite el interior de la Tierra es mu-

cho más difícil de comprender. Si bien sabemos que el movimiento convectivo en la Tierra es mucho, mucho más lento que el de la sopa hirviendo, quedan muchas preguntas sin respuesta: ¿Cuántas corrientes de convección existen? ¿Dónde y cómo se originan? ¿Cuál es su estructura?



Izq: Dibujo conceptual de corrientes de convección en el manto (ver texto). Por debajo de una profundidad de unos 700 km, la losa descendente comienza a ablandarse y fluir, perdiendo su forma. Leyenda: Trinchera, Tirón de losa, Cresta, Litosfera, Trinchera, Manto, Astenosfera, Núcleo externo, Núcleo interno. Der: Esquema de las corrientes de convección que se ven comúnmente en agua o sopa hirviendo. Esta analogía, sin embargo, no tiene en cuenta las enormes diferencias en el tamaño y las velocidades de flujo de estas celdas.

La convección no puede tener lugar sin una fuente de calor. El calor dentro de la Tierra proviene de dos fuentes principales: *la desintegración radiactiva* y *el calor residual*. La desintegración radiactiva, un proceso espontáneo que es la base de los "relojes isotópicos" utilizados para fechar las rocas, implica la pérdida de partículas del núcleo de un isótopo (el *padre*) para formar un isótopo de un nuevo elemento (el *hijo*). La desintegración radiactiva de los elementos químicos naturales, sobre todo el uranio, el torio y el potasio, libera energía en forma de calor que migra lentamente hacia la superficie de la Tierra. El calor residual es la energía gravitacional sobrante de la formación de la Tierra, hace 4600 millones de años, por la aglutinación y compresión de los desechos cósmicos. Cómo y por qué el escape del calor interior se concentra en ciertas regiones para formar células de convección sigue siendo un misterio.

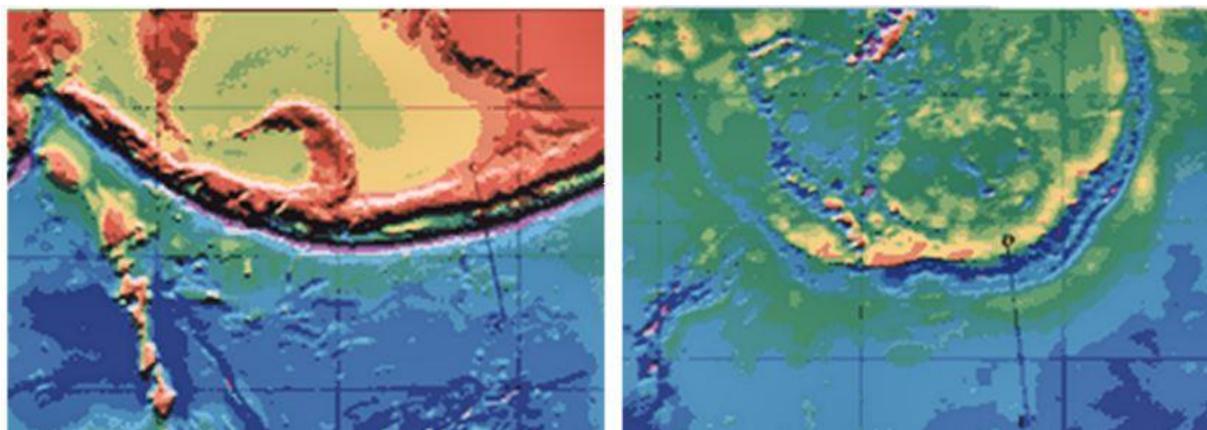
Hasta la década de 1990 las explicaciones predominantes sobre qué impulsa la tectónica de placas han enfatizado la convección del manto, y la mayoría de los científicos de la tierra creían que la expansión del fondo marino era el mecanismo principal. El material frío y más denso se proyecta hacia abajo debido a la gravedad y el material más caliente y ligero asciende; este flujo de material es una parte esencial de la convección. Además de las fuerzas convectivas, algunos geólogos argumentaban que la intrusión de magma en la dorsal en expansión proporciona una fuerza adicional (llamada "empuje de la dorsal") para impulsar y mantener el movimiento de las placas. Por tanto, los procesos de subducción se consideraban secundarios, una consecuencia lógica, pero en gran medida pasiva, de la expansión del fondo marino. No obstante, en los últimos años la marea ha cambiado. La mayoría de los científicos ahora favorecen la noción de que las fuerzas asociadas con la subducción son más importantes que la expansión del lecho marino. El profesor Seiya Uyeda (Universidad de Tokai, Japón), un experto en tectónica de placas de renombre mundial, concluyó en su discurso de apertura en

una importante conferencia científica sobre procesos de subducción en junio de 1994 que "la subducción... juega un papel más fundamental que la expansión del fondo marino en la configuración del características de la superficie de la tierra" y "hace funcionar la maquinaria de las placas tectónicas". El hundimiento controlado por la gravedad de una losa oceánica más densa y fría en la zona de subducción (llamado "tirón de la losa"), arrastrando el resto de la placa junto con ella, se considera ahora que es la fuerza impulsora de la tectónica de placas.

Sabemos que las fuerzas trabajando en lo profundo interior de la Tierra impulsan el movimiento de las placas, pero es posible que nunca entendamos completamente los detalles. En la actualidad, ninguno de los mecanismos propuestos puede explicar todas las facetas del movimiento de las placas; a causa de que estas fuerzas están enterradas tan profundamente, ningún mecanismo puede comprobarse directamente y demostrarse más allá de toda duda razonable. El hecho de que las placas tectónicas se hayan movido en el pasado y todavía se están moviendo hoy es indiscutible, pero los detalles de por qué y cómo se mueven seguirán desafiando a los científicos en el futuro.

¿Tectónica de placas extraterrestres?

La Tierra puede ser única en nuestro sistema solar, porque parece ser el único planeta que todavía es volcánico y tectónicamente activo; nuestro planeta, por tanto, permanece muy vivo, mientras que los otros aparentemente han cesado su actividad hace mucho tiempo. La actividad volcánica requiere una fuente de calor interno, y es el escape de este calor lo que alimenta la tectónica de placas. Si bien el vulcanismo desempeñó un papel importante en la historia temprana de Marte, la Luna y probablemente Mercurio, su pequeño tamaño en relación con la Tierra resultó en la pérdida de calor interno a un ritmo mucho más rápido. Han sido globos inactivos durante los últimos mil millones de años, más o menos.



Izq: imagen generada por computadora de la Trincheira de las Aleutianas (en violeta); los colores "cálidos" (de amarillo a rojo) indican alturas topográficas y los colores "fríos" (de verde a azul) representan elevaciones más bajas. Der: La topografía de Artemis Corona, una característica similar a una zanja en Venus, mostrada en la misma escala vertical y horizontal que la Fosa de las Aleutianas. (Imágenes cortesía de David T. Sandwell, Instituto Scripps de Oceanografía).

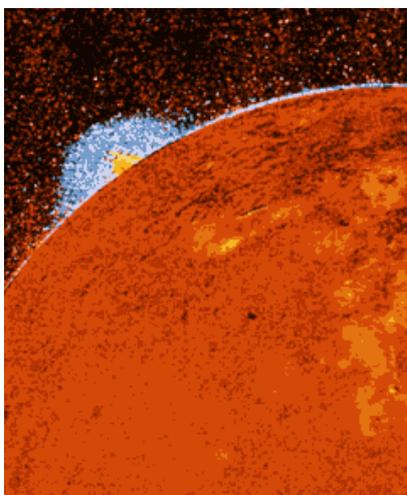
Es posible que Venus todavía esté activo, aunque la evidencia es cuestionable. En 1979, la nave espacial Pioneer-Venus midió una gran cantidad de azufre en la atmósfera superior del planeta; la cantidad de azufre luego disminuyó en los años siguientes. Esta observación sugirió que la alta concen-

tración de azufre medida en 1979 pudo haber resultado de un evento catastrófico, tal vez una erupción volcánica. A partir de 1990, las imágenes de radar realizadas por la nave espacial Magellan revelaron características volcánicas espectaculares y valles largos y profundos, similares en tamaño y forma a las fosas oceánicas de la Tierra.

La nave espacial Voyager descubrió varias columnas volcánicas que se elevaban a cientos de kilómetros sobre la superficie de Io, una de las lunas de Júpiter de tamaño aproximado a nuestra Luna. Los científicos especulan que pueden existir grandes charcos de azufre líquido en Io, posiblemente calentados por fuerzas de marea resultantes de la atracción gravitatoria entre Io y Júpiter. La energía térmica generada por tales fuerzas de marea puede ser suficiente para producir convección en el interior de Io, aunque nadie ha reconocido claramente ninguna característica superficial que pueda haberse formado a partir de dicha convección.

La superficie de Ganímedes, otra luna de Júpiter y del tamaño aproximado de Mercurio, está rota en muchos bloques en forma de placa, con depresiones largas y estrechas entre algunos de ellos. Si estas características superficiales representan "fósiles" de antiguas tectónicas de placas, o si algunas se están formando ahora activamente, queda por responder. Es crucial para determinar si hay tectónica de placas ocurriendo en Ganímedes la búsqueda de evidencia de un océano profundo debajo de su superficie helada. Tal cuerpo de agua, si existe, podría contribuir a la convección interna.

La velocidad de pérdida de calor es fundamental para la actividad tectónica de un planeta. El tamaño es un factor determinante: los cuerpos más grandes pierden calor más lentamente y, por tanto, permanecerán activos por más tiempo. Otro factor es la composición, que influye en la capacidad de convección de un cuerpo. Por ejemplo, un interior líquido, como el que puede existir dentro de Ganímedes, es más probable que convecte e impulse la tectónica de placas que los interiores "pedregosos" de la Luna, Mercurio, Venus y Marte. La cantidad de elementos radiactivos presentes en la composición del planeta también afecta la probabilidad de convección interna, porque la descomposición de estos elementos produce calor. Aparentemente, los interiores de la Luna, Mercurio y Marte son demasiado rígidos o han perdido demasiado de su calor interno para convección e impulsar la tectónica de placas.



Columna volcánica de gas de dióxido de azufre (SO₂) que se eleva unos 150 km sobre la superficie de Io. Esta imagen mejorada por computadora fue capturada "en vivo" por la nave espacial Voyager 2 el 4 de marzo de 1979. (Imagen cortés de NASA).

Con el tiempo, la Tierra también perderá tanto calor que su interior ya no habrá convección y cesará la actividad volcánica. No se formarán nuevas montañas, y el ciclo geológico de formación de montañas, erosión, sedimentación y formación de suelos se interrumpirá y también cesará. Exactamente cómo en una Tierra enfriada cambiarán las condiciones de la superficie, y si nuestro planeta seguirá siendo habitable, nadie lo sabe. Afortunadamente, ¡estos cambios no sucederán hasta dentro de muchos miles de millones de años!

¿Qué sucedió antes de la ruptura de Pangea?

Los movimientos de las placas tectónicas desde la ruptura del supercontinente Pangea se comprenden ahora bastante bien. La mayoría de los científicos creen que procesos similares también deben haber ocurrido antes. Sin embargo, la historia anterior a Pangea de la tectónica de placas es muy difícil de descifrar, porque casi toda la evidencia ha sido oscurecida por procesos geológicos y tectónicos de placas posteriores – incluida la subducción de la corteza oceánica más antigua – que trajeron consigo el registro de las inversiones magnéticas y las huellas de puntos calientes.

Las pistas de la tectónica de placas pasadas solo se pueden encontrar en los continentes actuales: en rocas, fósiles y estructuras de más de 200 millones de años. Esto se debe a que la edad media de la corteza oceánica actual es de unos 55 millones de años; las partes más antiguas tienen unos 180 millones de años, lo que indica que la corteza oceánica se recicla por completo cada 150 millones de años aproximadamente. Por el contrario, la edad media de la corteza continental actual es de unos 2300 millones de años, y las rocas más antiguas conocidas (aparte de los meteoritos) datan de 3960 millones de años; estas rocas más antiguas, a su vez, contienen minerales (*zirconios*) derivados de rocas más antiguas, posiblemente de hasta 4300 millones de años.

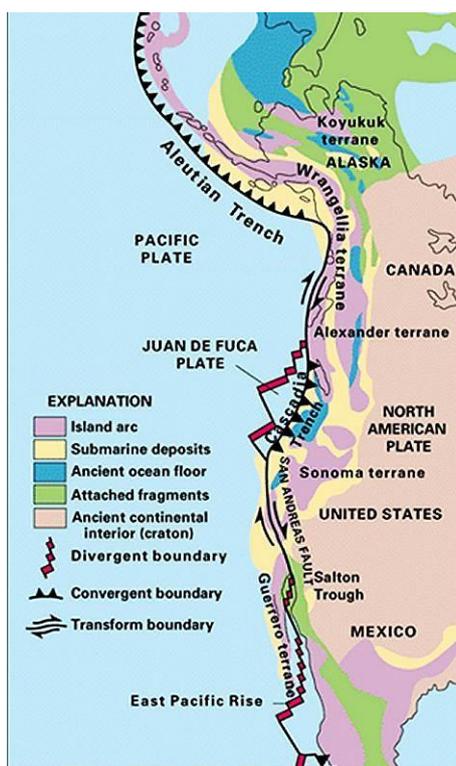
Los continentes están formados por bloques de corteza que varían en edad, tamaño, composición de rocas, estructura y conjuntos de fósiles (fauna y flora). En general, la mayoría de los continentes tienen interiores más antiguos y estables (llamados *cratones*), mientras que las zonas que bordean los cratones generalmente consisten en rocas más jóvenes y estructuralmente más complicadas. Algunas zonas limítrofes están compuestas por restos de la antigua litosfera oceánica, arcos volcánicos o cadenas montañosas – razonablemente interpretados como productos de la tectónica de placas anterior a Pangea – que se han adherido a los cratones. En otras regiones, sin embargo, el arreglo geológico de estos remanentes adjuntos parecía totalmente caótico, desafiando una explicación razonable por parte de los geólogos hasta hace poco. Por ejemplo, un remanente caracterizado por un tipo específico de roca o fósil de edad distintiva puede estar junto a otros remanentes caracterizados por grupos de rocas o fósiles completamente diferentes, o estar rodeado por ellos, aunque puedan ser similares en edad geológica. Con el modelo de tectónica de placas, ahora ha sido posible proporcionar explicaciones más racionales para estas zonas de remanentes de la corteza, extrañamente yuxtapuestas.

Los científicos reconocen ahora que los márgenes continentales son a menudo un mosaico de fragmentos de litosfera que se han agregado como resultado de las placas que chocan entre sí durante el movimiento. El proceso por el cual los fragmentos litosféricos, en realidad pedazos de otras placas, se adhirieron a los continentes se llama *acreción*. Dichos fragmentos pueden ser de origen continental u oceánico; si son lo suficientemente grandes y comparten características geológicas similares, estos fragmentos se denominan *terranos*. Los terranos que parecen estar fuera de lugar geológicamente, llamados terranos *exóticos* o *sospechosos*, están compuestos por pedazos de placas que se han desprendido y luego se han desplazado grandes distancias antes de adherirse (*acrecionar*) algún otro

terrano o masa de tierra continental. El oeste de América del Norte es un ejemplo de una región geológica compleja que se interpreta mejor como un mosaico de varios terranos viajeros a gran distancia que se acumularon después de la ruptura de Pangea.

En años recientes el estudio de los terranos (denominado “tectónica de terranos” o “análisis de terranos”) se ha convertido en un campo especializado dentro de la investigación de la tectónica de placas. Dichos estudios sugieren que la tectónica de placas ha estado operando de alguna manera desde muy temprano en la historia de la Tierra, quizás desde hace 3800 millones de años. Parece que está surgiendo una imagen intrigante, pero incompleta: ha habido varios ciclos de formación de supercontinentes, cada uno seguido de rupturas y desplazamientos posteriores de las partes fragmentadas. La propia Pangea puede haberse formado por la agregación de continentes separados, que se juntaron después de la ruptura de un supercontinente más antiguo que existió hace unos 550 millones de años.

David G. Howell (USGS, Menlo Park, California), especialista en análisis de terranos, compara ese movimiento de los continentes, cuando las placas se unen y separan una y otra vez a lo largo de la historia de la Tierra, con el movimiento de los "autos de choque – carros locos – litosféricos". Sin embargo, hay varias diferencias importantes: esta comparación imaginativa ignora el hecho de que los autos de choque eléctricos en los parques de diversiones pueden moverse de forma independiente, en lugar de ser partes de un sistema integrado. ¡Y sus velocidades promedio son al menos 500 millones de veces más rápidas que las de las placas tectónicas!



Norteamérica occidental, mostrando algunas características pre-tectónicas importantes y el mosaico de terranos exóticos provenientes de lugares lejanos, pegados contra el interior estable y de larga vida del continente (ver texto). (Modificado de la ilustración provista por Oceanus Magazine; figura original de Jack Cook, Institución Oceanográfica Woods Hole).

David G. Howell (USGS, Menlo Park, California), especialista en análisis de terranos, compara ese movimiento de los continentes, cuando las placas se unen y separan una y otra vez a lo largo de la historia de la Tierra, con el movimiento de los "autos de choque – carros locos – litosféricos". Sin embargo, hay varias diferencias importantes: esta comparación imaginativa ignora el hecho de que los autos de choque eléctricos en los parques de diversiones pueden moverse de forma independiente, en lugar de ser partes de un sistema integrado. ¡Y sus velocidades promedio son al menos 500 millones de veces más rápidas que las de las placas tectónicas!

Las placas tectónicas y la población

A lo largo del tiempo geológico, los movimientos de las placas junto con otros procesos geológicos, como la erosión de los glaciares y los arroyos, han creado algunos de los paisajes más magníficos de la naturaleza. El Himalaya, los Alpes Suizos y los Andes son algunos ejemplos espectaculares. Sin embargo, los terremotos violentos relacionados con la tectónica de placas han causado catástrofes terribles, como el terremoto de magnitud 7,7 que azotó la provincia china de Hebei en 1976 y mató a unas 800.000 personas.

Riesgos naturales

La mayoría de los terremotos y erupciones volcánicas no ocurren al azar, sino que ocurren en áreas específicas, como a lo largo de los límites de las placas. Una de esas áreas es el *Anillo de Fuego del Pacífico*, donde la Placa del Pacífico se encuentra con muchas placas circundantes. El Anillo de Fuego es la zona con mayor actividad sísmica y volcánica del mundo.

Terremotos

Debido a que muchos centros de población importantes están ubicados cerca de zonas de fallas activas, como San Andrés, millones de personas han sufrido pérdidas personales y económicas como resultado de terremotos destructivos, y aún más han experimentado movimientos sísmicos. No es de extrañar que algunas personas creen que, cuando el "Más Grande" golpee, California de repente se "separará" y "caerá en el Pacífico", o que la Tierra se "abrirá" a lo largo de la falla y se "tragará" personas, automóviles, y casas. Tales creencias no tienen base científica alguna. Aunque el deslizamiento de tierra comúnmente ocurre en un gran terremoto, la Tierra no se abrirá. California tampoco caerá al mar, porque la zona de falla sólo se extiende unos 15 km de profundidad, que es sólo una cuarta parte del espesor de la corteza continental. Además, California está compuesta de corteza continental, cuya densidad relativamente baja la mantiene flotando en lo alto, como un iceberg sobre el océano.

Como todos los límites de placas transformantes, San Andrés es una *falla de deslizamiento*, cuyo movimiento es predominantemente horizontal. Específicamente, la zona de la falla de San Andrés separa las Placas del Pacífico y de América del Norte, que se deslizan lentamente entre sí en una dirección aproximada de norte a sur. La Placa del Pacífico (lado occidental de la falla) se mueve horizontalmente en dirección norte en relación con la Placa de América del Norte (lado este de la falla). La evidencia del desplazamiento lateral de estas dos masas de tierra se puede encontrar a lo largo de la zona de la falla, como se ve en las diferencias en la topografía, las estructuras geológicas y, a veces, en la vegetación del terreno de un lado de la falla al otro. Por ejemplo, el San Andrés corre directamente a lo largo del embalse de Crystal Springs en la península de San Francisco. Topográfica-

mente, este depósito se llena a lo largo de un valle angosto y recto que se formó por la erosión de las rocas fácilmente erosionables trituradas dentro de la zona de la falla.

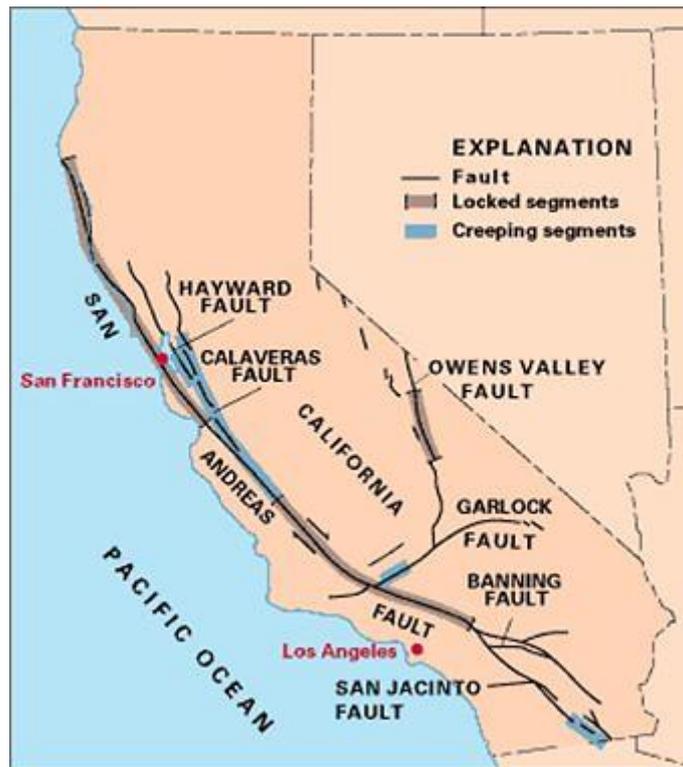


Vista aérea, mirando al norte hacia San Francisco, de la Reserva de Crystal Springs, que sigue a la región de la falla de San Andrés. (Fotografía de Robert E. Wallace, USGS).

El movimiento a lo largo de San Andrés puede ocurrir, o bien en sacudidas repentinas, o en un movimiento lento y constante llamado *creep* (deslizado sigiloso). Los segmentos de falla que se arrastran activamente experimentan muchos terremotos de pequeños a moderados, que causan poco o ningún daño. Estos segmentos progresivos están separados por segmentos de actividad sísmica poco frecuente (llamados *gaps sísmicos*), áreas que están atascadas o bloqueadas en su lugar dentro de la zona de falla. Los segmentos bloqueados almacenan una enorme cantidad de energía que puede acumularse durante décadas, o incluso siglos, antes de desencadenarse en terremotos devastadores. Por ejemplo el gran terremoto de San Francisco de 1906 (magnitud de 8.3) in 1906 tuvo lugar a lo largo de un segmento bloqueado de 430 km de longitud en San Andrés, que se extiende desde Cabo Mendocino hacia el sur hasta San Juan Bautista.

Las tensiones que se acumulan a lo largo de un segmento bloqueado de la falla y la liberación repentina se pueden visualizar doblando un palo hasta que se rompa. El palo se doblará con bastante facilidad, hasta cierto punto, hasta que la tensión sea demasiado grande y se rompa. Las vibraciones que se sienten cuando se rompe el palo representan la liberación repentina de la energía acumulada. De manera similar, las vibraciones sísmicas producidas cuando el suelo se rompe repentinamente se irradian a través del interior de la Tierra desde el punto de ruptura, llamado *foco sísmico*. El punto geográfico directamente sobre el foco se llama *epicentro del terremoto*. En un gran terremoto, la energía liberada puede causar daños a cientos o miles de kilómetros del epicentro.

El terremoto de Loma Prieta de magnitud 7,1, de octubre de 1989, ocurrió a lo largo de un segmento de la falla de San Andrés que había estado bloqueada desde el gran terremoto de San Francisco de 1906. Aunque el foco del terremoto (aproximadamente 80 km al sur de San Francisco) se centró en una parte escasamente poblada de las montañas de Santa Cruz, el terremoto causó 62 muertes y casi \$6 mil millones en daños.



Mapa de San Andrés y algunas de las otras fallas en California, cuyos segmentos muestran diferente comportamiento: bloqueado o deslizante (ver texto). (Simplificado del USGS Professional Paper 1515). Leyenda (de arriba hacia abajo). Explicación: Falla, Segmento bloqueado, Segmento deslizante, Falla de Hayward, Falla Calaveras, Falla Garlock, Falla Banning, Falla Andrea, Falla San Jacinto.



Caballos muertos por la caída de escombros durante el Gran Terremoto de San Francisco de 1906, cuando un segmento bloqueado de la falla de San Andrés se sacudió repentinamente, causando un devastador terremoto de magnitud 8,3. (Fotografía de Edith Irvine, cortesía de la Biblioteca de la Universidad Brigham Young, Provo, Utah).

El terremoto de Loma Prieta de magnitud 7,1, de octubre de 1989, ocurrió a lo largo de un segmento de la falla de San Andrés que había estado bloqueada desde el gran terremoto de San Francisco de 1906. Aunque el foco del terremoto (aproximadamente 80 km al sur de San Francisco) se centró en

una parte escasamente poblada de las montañas de Santa Cruz, el terremoto causó 62 muertes y casi \$6 mil millones en daños. Tras el terremoto de Loma Prieta, la falla permanece bloqueada desde Pt. Arena – donde ingresa a California desde el océano – hacia el sur a través de San Francisco y la península al oeste de la Bahía de San Francisco, lo que representa la amenaza potencial de un terremoto destructivo a ocurrir en un área mucho más densamente poblada.

La menos conocida falla Hayward, que corre al este de la Bahía de San Francisco puede, sin embargo, representar una amenaza potencial tan grande o quizás incluso mayor que la San Andrés. A partir de las escenas televisadas de los daños causados por el terremoto de magnitud 7,2 que sacudió Kobe, Japón, el 16 de enero de 1995, los residentes del Área de la Bahía vieron la posible devastación que podría ocurrir si un terremoto de magnitud comparable azotara la falla de Hayward. Esto se debe a que las fallas de Hayward y Nojima que produjeron el terremoto de Kobe son bastante similares en varios aspectos. No sólo son del mismo tipo (golpe-deslizamiento), sino que también tienen aproximadamente la misma longitud (60 y 80 km) y ambas atraviesan áreas urbanas densamente pobladas, con muchos edificios, autopistas y otras estructuras construidas en un vertedero inestable de la bahía.

El 17 de enero de 1994, uno de los desastres naturales más costosos en la historia de los Estados Unidos azotó el sur de California. Un terremoto de magnitud 6,6 golpeó cerca de Northridge, una ciudad ubicada en el populoso Valle de San Fernando, justo al norte de Los Ángeles, California. Este desastre, que mató a más de 60 personas, causó daños estimados en \$30 mil millones, casi cinco veces más que el terremoto de Loma Prieta. El terremoto de Northridge no involucró directamente el movimiento a lo largo de una de las ramas del sistema de fallas de San Andrés. En cambio, ocurrió a lo largo de la falla de empuje de las montañas de Santa Mónica, una de las varias fallas ocultas más pequeñas (llamadas *fallas ciegas de empuje*) al sur de la zona de la falla de San Andrés, donde gira hacia el este, aproximadamente paralela a la Región de la Cordillera Transversal. En una *falla de empuje*, cuyo plano está inclinado hacia la superficie de la Tierra, un lado se mueve hacia arriba sobre el otro. El movimiento a lo largo de una falla ciega de empuje no rompe la superficie del suelo, por lo que es difícil o imposible mapear estas fallas ocultas, pero potencialmente peligrosas. Aunque los científicos han encontrado un levantamiento medible en varios lugares de la Cordillera Transversal, no han encontrado ninguna evidencia concluyente de la ruptura del suelo por el terremoto de Northridge de 1994. Terremotos similares azotaron la región en 1971 y 1987; el terremoto de San Fernando (1971) causó daños sustanciales, incluido el colapso de un hospital y varios pasos elevados de autopistas.

No todos los movimientos de fallas son tan violentos y destructivos. Cerca de la ciudad de Hollister en el centro de California, la Falla de Calaveras gira hacia San Andrés. Allí la falla de Calaveras se arrastra a un ritmo lento y constante, lo que representa poco peligro. Gran parte de la falla de Calaveras se desliza a una tasa promedio de 5 a 6 mm/año. En promedio, Hollister tiene unos 20000 terremotos al año, la mayoría de los cuales son demasiado pequeños para que los sientan los residentes. Es raro que un área que sufre deslizamiento experimente un terremoto con una magnitud superior a 6.0, porque la tensión se alivia continuamente y, por tanto, no se acumula. El movimiento de arrastre de la falla generalmente no representa una amenaza, lo que resulta solo en un desplazamiento gradual de caminos, cercas, aceras, tuberías y otras estructuras que cruzan la falla. Sin embargo, la persistencia de la fluencia de fallas plantea una molestia costosa en términos de mantenimiento y reparación.

Los terremotos de placas medias – los que ocurren en el interior de las placas – son mucho menos

frecuentes que los que se producen a lo largo de los límites de las placas, y más difíciles de explicar. Lo más probable es que los terremotos a lo largo de la costa atlántica de los Estados Unidos estén relacionados, de alguna manera, con el movimiento hacia el oeste de la placa norteamericana alejándose de la dorsal mesoatlántica, un proceso continuo que comenzó con la ruptura de Pangea. Sin embargo, aún no se comprenden las causas de estos terremotos poco frecuentes.

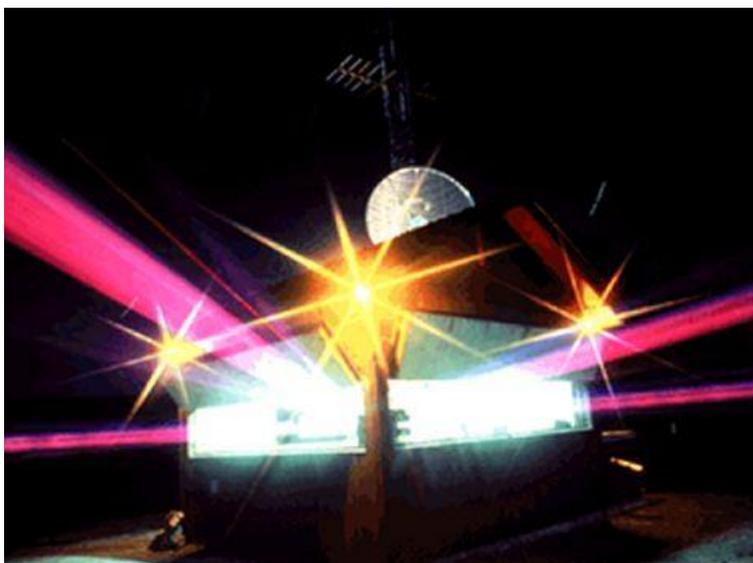
Los terremotos de la costa este, como el que sacudió Charleston, Carolina del Sur, en 1886 se sienten en un área mucho más grande que los terremotos que ocurren en la costa oeste, porque la mitad este del país está compuesto principalmente de roca más antigua que no ha sido fracturada ni agrietada por actividad sísmica frecuente en el pasado geológico reciente. La roca altamente fracturada y triturada absorbe más energía sísmica que la roca menos fracturada. El terremoto de Charleston, con una magnitud estimada de alrededor de 7,0, se sintió tan lejos como en Chicago, a más de 1300 km al noroeste, mientras que el terremoto de Loma Prieta de magnitud 7,1 se sintió no más allá de Los Ángeles, a unos 500 km al sur. Los terremotos más ampliamente difundidos que jamás hayan azotado a los Estados Unidos se centraron cerca de la ciudad de New Madrid, Missouri, en 1811 y 1812. Tres terremotos, que se sintieron tan lejos como Washington DC, se estimaron en una magnitud superior a 8,0. La mayoría de nosotros no asociamos los terremotos con la ciudad de Nueva York, pero debajo de Manhattan hay una red de fallas que se cruzan, algunas de las cuales son capaces de causar terremotos. El terremoto más reciente que azotó la ciudad de Nueva York ocurrió en 1985 y midió 4.0 en magnitud; un par de terremotos (magnitud 4.0 y 4.5) sacudieron Reading, Pensilvania, en enero de 1994, causando daños menores.



Izquierda: El deslizamiento a lo largo de la falla de Calaveras ha doblado el muro de contención y desplazado la acera a lo largo de 5th Street en Hollister, California (unos 75 km al sur-sureste de San José). Derecha: primer plano del desfase del bordillo o contén (Fotografías de W. Jacquelyne Kiou).

En general, sabemos cómo ocurren la mayoría de los terremotos, pero ¿podemos predecir cuándo ocurrirán? Esta pregunta ha desafiado y frustrado a los científicos que estudian los posibles precursores de terremotos moderados y grandes. Desde principios de la década de 1980 los geólogos y sismó-

logos han estado estudiando intensamente un segmento de San Andrés cerca del pequeño pueblo de Parkfield, ubicado a mitad de camino entre San Francisco y Los Ángeles, para tratar de detectar los cambios físicos y químicos que podrían tener lugar – tanto arriba como bajo tierra – antes de que ocurra un terremoto. El USGS y las agencias estatales y locales han cubierto Parkfield y el campo circundante con sismógrafos, medidores de fluencia, medidores de tensión y otros dispositivos de medición del movimiento del suelo.



Fotografía de exposición temporal del sistema de medición del movimiento del suelo con láser electrónico en funcionamiento en Parkfield, California, para rastrear el movimiento a lo largo de la falla de San Andrés (ver texto). (Fotografía de John Nakata, USGS).

El segmento de Parkfield ha experimentado terremotos de magnitud 6.0 cada 22 años en promedio desde 1881. Durante los dos terremotos más recientes (1934, 1966), la misma sección de la falla se deslizó y la cantidad de deslizamiento fue aproximadamente la misma. En 1983, esta evidencia, además de la historia anterior registrada de actividad sísmica, llevó al USGS a predecir que había un 95 por ciento de probabilidad de que un terremoto de 6.0 golpeará a Parkfield antes de 1993. Pero el terremoto anticipado de magnitud 6.0 o mayor no se materializó. El experimento de Parkfield continúa y sus objetivos principales permanecen sin cambios: emitir una predicción a corto plazo; monitorear y analizar los efectos geofísicos y geoquímicos antes, durante y después del terremoto anticipado, así como desarrollar comunicaciones efectivas entre científicos, funcionarios de manejo de emergencias y el público para responder a los peligros de terremotos. Mientras que los científicos están estudiando e identificando posibles precursores que conduzcan al próximo terremoto de Parkfield, también están analizando estos mismos precursores para ver si pueden estar ocurriendo junto con otros segmentos de la falla. Los geocientíficos han utilizado los estudios de terremotos pasados, junto con los datos y la experiencia obtenidos del experimento de Parkfield, para estimar las probabilidades de que ocurran grandes terremotos a lo largo de todo el sistema de fallas de San Andrés. En 1988 el USGS identificó seis segmentos de San Andrés como los más propensos a ser golpeados por un terremoto de magnitud 6.5 o mayor en los próximos treinta años (1988–2018). El terremoto de Loma Prieta en 1989 ocurrió a lo largo de uno de estos seis segmentos. El experimento de Parkfield y otros estudios realizados por el USGS como parte del Programa Nacional de Reducción de Riesgos de

Terremotos han llevado a una mayor conciencia pública y oficial de la inevitabilidad de futuras actividades sísmicas en California. En consecuencia, los residentes y los funcionarios estatales y locales se han vuelto más diligentes en la planificación y preparación para el próximo gran terremoto.

Erupciones volcánicas

Al igual que los terremotos, la actividad volcánica está ligada a procesos de tectónica de placas. La mayoría de los volcanes activos sobre el oceano mundial están ubicados cerca de los límites de las placas convergentes, donde ocurre la subducción, particularmente alrededor de la cuenca del Pacífico. Sin embargo, mucho más vulcanismo – que produce alrededor de las tres cuartas partes de toda la lava que hizo erupción en la Tierra – tiene lugar bajo el océano, principalmente a lo largo de los centros de expansión oceánica, como la Dorsal del Atlántico Medio y la Dorsal del Pacífico Oriental.

Los volcanes de la zona de subducción como El monte Santa Helena (en el estado de Washington) y el monte Pinatubo (Luzón, Filipinas) se denominan *conos compuestos* y normalmente entran en erupción con fuerza explosiva, porque el magma es demasiado rígido para permitir el escape fácil de los gases volcánicos. Como consecuencia, tremendas presiones internas aumentan a medida que los gases atrapados se expanden durante el ascenso, antes de que la presión acumulada se libere repentinamente en una erupción violenta. Un proceso tan explosivo puede compararse con poner el pulgar sobre una botella abierta de una bebida carbonatada, agitarla vigorosamente y luego retirar rápidamente el pulgar. La acción de agitación separa los gases del líquido para formar burbujas, aumentando la presión interna. La liberación rápida del pulgar permite que los gases y el líquido salgan a borbotones con una velocidad y una fuerza explosivas.

En 1991 dos volcanes en el borde occidental de la placa filipina produjeron grandes erupciones. En junio 15 el Monte Pinatubo escupió 40 km de ceniza hacia la atmósfera y produjo enormes flujos de ceniza (también llamados *flujos piroclásticos*, así como flujos de lodo que devastaron una gran área alrededor del volcán. El Pinatubo, ubicado a 90 km de Manila, estuvo inactivo durante 600 años antes de la erupción de 1991, que se ubica como una de las erupciones más grandes de este siglo. También en 1991, el volcán Unzen de Japón, ubicado en la isla de Kyushu, a unos 40 km al este de Nagasaki, despertó de su letargo de 200 años para producir un nuevo domo de lava en su cumbre. A partir de junio, los repetidos colapsos de este domo activo generaron destructivos flujos de ceniza que descendieron por sus laderas a velocidades de hasta 200 km por hora. Unzen es uno de los más de 75 volcanes activos en Japón; su erupción en 1792 mató a más de 15000 personas, el peor desastre volcánico en la historia del país.

Si bien las erupciones de Unzen han causado muertes y daños locales considerables, el impacto de la erupción del Monte Pinatubo en junio de 1991 fue global. Las temperaturas ligeramente más frías de lo habitual registradas en todo el mundo y las brillantes puestas de sol y amaneceres se han atribuido a esta erupción, que envió cenizas finas y gases a la estratosfera formando una gran nube volcánica que se desplazó por todo el mundo. El dióxido de azufre (SO₂) en esta nube, alrededor de 22 millones de toneladas, se combinó con agua para formar gotas de ácido sulfúrico, bloqueando la llegada a la Tierra de parte de la luz solar y, por tanto, enfriando las temperaturas en algunas regiones hasta 0,5 °C. Una erupción del tamaño del Monte Pinatubo podría afectar el clima durante algunos años. Un fenómeno similar ocurrió en abril de 1815 con la erupción catastrófica del volcán Tambora en Indonesia, la erupción más poderosa registrada en la historia. La nube volcánica de Tambora redujo las

temperaturas globales hasta en 3 °C. Incluso un año después de la erupción, la mayor parte del hemisferio norte experimentó temperaturas mucho más bajas durante los meses de verano. En parte de Europa y América del Norte, 1816 fue conocido como "el año sin verano".



Un penacho volcánico de 18 km de altura de una de varias erupciones explosivas del Monte Pinatubo, que comenzó el 12 de junio de 1991, visto desde la base aérea de Clark (unos 20 km al este del volcán). Tres días después, la erupción más poderosa produjo un penacho que se elevó casi 40 km, penetrando a fondo en la estratosfera. (Fotografía de David H. Harlow, USGS).

Además de posiblemente afectar el clima, las nubes volcánicas de las erupciones explosivas también representan un peligro para la seguridad de la aviación. Durante las últimas dos décadas, más de 60 aviones, en su mayoría jets de líneas comerciales, han resultado dañados por encuentros en vuelo con ceniza volcánica. Algunos de estos encuentros han resultado en la pérdida de potencia de todos los motores, lo que ha requerido aterrizajes de emergencia. Afortunadamente, hasta la fecha no se han producido caídas en jets que hayan volado sobre cenizas volcánicas.

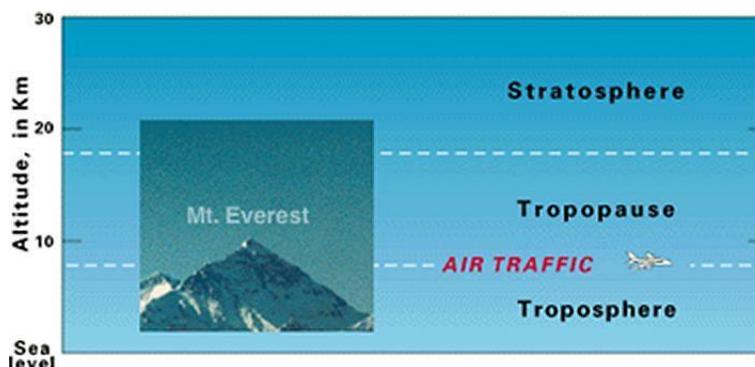


Diagrama que muestra las dos capas inferiores de la atmósfera: la troposfera y la estratosfera. La tropopausa, el límite entre estas dos capas, varía en altitud de 8 a 18 km (líneas blancas discontinuas), según la latitud de la Tierra y la estación del año. La foto insertada del Monte Everest y las altitudes comunes de vuelo de los aviones comerciales se dan como referencia. (Fotografía de David G. Howell, USGS).

Desde el año 1600 dC casi 300000 personas han muerto a causa de las erupciones volcánicas. La mayoría de las muertes fueron causadas por *flujos piroclásticos* y *flujos de lodo*, peligros mortales que a menudo acompañan a las erupciones explosivas de los volcanes en la zona de subducción. Los flujos piroclásticos, también llamados *nuées ardentes* ("*nubes brillantes*" en francés), son mezclas incandescentes de escombros volcánicos calientes, cenizas y gases que se mueven rápidamente, se asemejan a avalanchas y se adhieren al suelo y pueden viajar a velocidades superiores a 150 km por hora.

Aproximadamente 30000 personas murieron a causa de los flujos piroclásticos durante la erupción de 1902 del Mont Pelée en la isla de Martinica, en el Caribe. En marzo–abril de 1982 tres erupciones explosivas del volcán El Chichón, en el estado de Chiapas, sureste de México, provocaron el peor desastre volcánico en la historia de ese país. Las aldeas en un radio de 8 km del volcán fueron destruidas por flujos piroclásticos que mataron a más de 2000 personas.

Los flujos de lodo (también llamados *flujos de escombros* o *lahares*, un término indonesio para flujos de lodo volcánico) son mezclas de desechos volcánicos y agua. El agua generalmente proviene de dos fuentes: la lluvia o la licuación de la nieve y el hielo por los desechos volcánicos calientes.

En dependencia de la proporción de agua y material volcánico, los flujos de lodo pueden variar desde inundaciones espesas hasta flujos espesos que tienen la consistencia del cemento húmedo. A medida que los flujos de lodo descenden por las laderas empinadas de los volcanes compuestos, tienen la fuerza y la velocidad para aplastar o enterrar todo lo que encuentran a su paso. La ceniza caliente y los flujos piroclásticos de la erupción del Volcán Nevado del Ruiz en Colombia, Sudamérica, fundieron la nieve y el hielo en la cima del pico andino de 5390 m de altura; las avalanchas de lodo que siguieron enterraron la ciudad de Armero, matando a 25.000 personas.



Vista aerea de la ciudad de Armero, Colombia, devastada por flujos de fango activados por la erupción de Nevado del Ruiz en noviembre de 1985. El flujo de lodo destruyó todo a su paso y mató a unas 25000 personas. (Fotografía de Darrell G. Herd, USGS).

Las erupciones de los volcanes de Hawai y la mayoría de los demás volcanes de placa media difieren mucho de las de los conos compuestos. Mauna Loa y Kilauea, en la isla de Hawái, son conocidos

como *volcanes en escudo*, porque se asemejan a la forma ancha y redondeada del escudo de un antiguo guerrero. Los volcanes en escudo tienden a entrar en erupción de forma no explosiva, principalmente arrojando grandes volúmenes de lava fluida. Las erupciones de tipo hawaiano rara vez ponen en peligro la vida, porque la lava avanza lo suficiente lento como para permitir la evacuación segura de las personas, pero los grandes flujos de lava pueden causar pérdidas económicas considerables al destruir propiedades y tierras agrícolas. Por ejemplo, la lava de la erupción en curso de Kilauea, que comenzó en enero de 1983, destruyó más de 200 estructuras, enterró kilómetros de carreteras e interrumpió la vida cotidiana de los residentes locales. Debido a que los volcanes hawaianos entran en erupción con frecuencia y representan poco peligro para los humanos, proporcionan un laboratorio natural ideal para estudiar con seguridad los fenómenos volcánicos a corta distancia. El USGS Hawaiian Volcano Observatory, en el borde de Kilauea, fue uno de los primeros observatorios de volcanes modernos del mundo, establecido a principios de este siglo.

En la historia registrada, las erupciones explosivas en la zona de subducción (límite convergente) de los volcanes han representado el mayor peligro para las civilizaciones. Sin embargo, los científicos han estimado que alrededor de las tres cuartas partes del material que hace erupción en la Tierra cada año se origina en las dorsales en medio del océano. Sin embargo, aún no han observado ninguna erupción submarina profunda "en vivo". Debido a que las grandes profundidades del agua impiden una fácil observación, se han realizado pocos estudios detallados de los numerosos sitios de erupción posibles a lo largo de la tremenda longitud (50000 km) del sistema global de dorsales oceánicas. No obstante, estudios repetidos recientemente de sitios específicos a lo largo de la cresta de Juan de Fuca, frente a la costa de Oregón y Washington, han mapeado depósitos de lava fresca, que deben haber entrado en erupción en algún momento entre los estudios. En junio de 1993 señales sísmicas típicamente asociadas con erupciones submarinas, llamadas *fases T*, se detectaron a lo largo de parte de la dorsal Juan de Fuca en expansión y se interpretaron como causadas por actividad eruptiva.



El Centro de visitantes de Wahaula, Parque Nacional de los Volcanes de Hawái, fue una de las más de 200 estructuras invadidas por flujos de lava (primer plano) desde la erupción de 1983 hasta el presente en el volcán Kilauea. (Fotografía de JD Griggs, USGS).

En Islandia, donde la dorsal mesoatlántica está expuesta en tierra, la historia es otra. Es fácil ver que

muchos volcanes islandeses entran en erupción de forma no explosiva a partir de respiraderos de fisura, de manera similar a las erupciones hawaianas típicas; otros, como el volcán Hekla, entran en erupción de forma explosiva. (Después de la catastrófica erupción de Hekla en 1104, en el mundo cristiano se pensó que era la "Boca al Infierno"). La erupción voluminosa, pero en su mayoría no explosiva, en Lakagíggar (Laki), Islandia, en 1783, resultó en una de los peores desastres volcánicos del mundo. Unas 9000 personas, casi el 20% de la población del país en ese momento, murieron de hambre *después* de la erupción, porque su ganado había muerto por pastar en pasto contaminado con gases ricos en flúor emitidos durante esta erupción de ocho meses.

Tsunamis

Los grandes terremotos que ocurren a lo largo de las zonas de subducción son especialmente peligrosos porque pueden desencadenar tsunamis (de la palabra japonesa *tsunami* que significa "ola de puerto") y representan un peligro potencial para las comunidades costeras y las islas que salpican el Pacífico. Los tsunamis a menudo se denominan erróneamente "maremotos" cuando, de hecho, no tienen nada que ver con la acción de las mareas. Más bien, los tsunamis son olas marinas sísmicas causadas por terremotos, deslizamientos de tierra submarinos y, con poca frecuencia, por erupciones de volcanes insulares. Durante un gran terremoto el lecho marino puede moverse varios metros y una enorme cantidad de agua se pone en movimiento repentinamente, moviéndose de un lado a otro durante varias horas. El resultado es una serie de olas que cruzan el océano a velocidades de más de 800 km por hora, comparables a las de los aviones comerciales. La energía y el impulso de estas olas transoceánicas pueden llevarlas a miles de kilómetros desde su origen antes de estrellarse en lejanas islas o zonas costeras.



Una ola gigante engulle el muelle de Hilo, Hawái, durante el tsunami de 1946, que mató a 159 personas. La flecha apunta a un hombre que fue arrastrado segundos después. (Fotografía retocada cortesía de NOAA/EDIS).

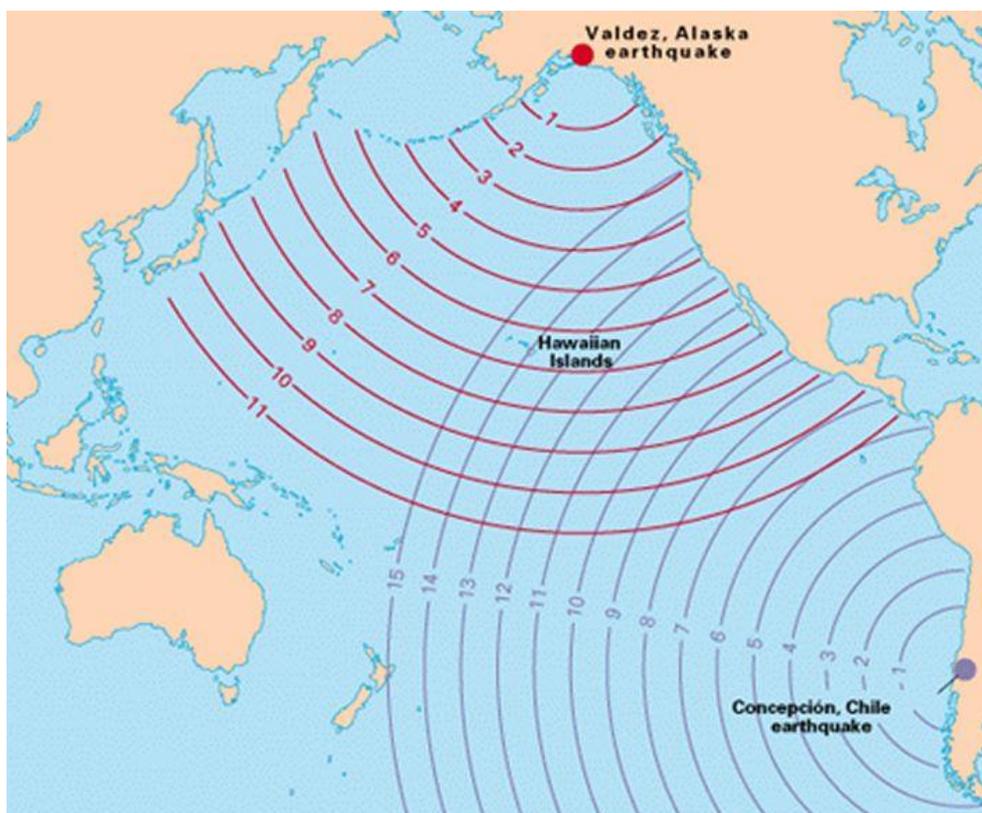
Para alguien en un barco en mar abierto, el paso de una ola de tsunami apenas eleva la superficie del agua. Sin embargo, cuando llega a aguas menos profundas cerca de la costa y "toca fondo", la ola del tsunami aumenta de altura y se acumula en una enorme pared de agua. A medida que el tsunami se acerca a la costa, el agua cerca de la costa suele retroceder durante varios minutos, lo suficiente como para atraer a alguien a recoger conchas marinas, peces, etc. expuestos, antes de precipitarse repentinamente hacia tierra a una velocidad y altura aterradoras. El 1883 La erupción del volcán Kra-

katau, ubicado en el estrecho de Sunda entre las islas de Sumatra y Java, Indonesia, brinda un excelente ejemplo de un tsunami causado por una erupción. Una serie de tsunamis arrasó con 165 pueblos costeros en Java y Sumatra, matando a 36000 personas. Los mareógrafos registraron los tsunamis más grandes en lugares tan lejanos como la costa sur de la Península Arábiga, ¡a más de 7000 km de Krakatoa!

A causa de los tsunamis asesinos del pasado, que han dado origen a cientos de muertes en la isla de Hawái y en otros lugares, en 1965 se creó el *Centro Internacional de Información sobre Tsunamis*. Este centro emite alertas de tsunami a partir de la ocurrencia de terremotos y de la altura de las olas, recopilando información proveniente de dispositivos sísmicos y de mareas localizados alrededor de la cuenca del Océano Pacífico y en Hawai.

Recursos naturales

Muchos de los recursos naturales de energía, minerales y suelo de la Tierra se concentran cerca de los límites de placas pasados o presentes. El uso de estos recursos fácilmente disponibles ha sido el sustento de civilizaciones humanas, tanto ahora como en el pasado.



Las islas hawaianas son especialmente vulnerables a los tsunamis destructivos generados por grandes terremotos en el Anillo de Fuego del Pacífico. Se muestran los tiempos de viaje (en horas) para los tsunamis producidos por el terremoto (earthquake) de 1960 en Concepción, Chile, (curvas moradas) y por el terremoto de 1964 del Viernes Santo, Valdez (Anchorage), Alaska (curvas rojas). El tsunami de 1960 mató a 61 personas y causó daños por unos 24 millones de dólares.

Suelos fértiles

Los volcanes claramente pueden causar mucho daño y destrucción, pero a largo plazo también han beneficiado a las personas. Durante miles o millones de años, la descomposición física y la meteorización química de las rocas volcánicas han formado algunos de los suelos más fértiles de la Tierra. En las regiones intropicales y lluviosas, como el lado de barlovento (noreste) de la isla de Hawái, la formación de suelo fértil y el crecimiento de una vegetación exuberante después de una erupción puede tardar unos pocos cientos de años. Algunas de las primeras civilizaciones (por ejemplo, la griega, la etrusca y la romana) se asentaron en los ricos y fértiles suelos volcánicos de la región del Mediterráneo y el Egeo. Algunas de las mejores regiones arroceras de Indonesia se encuentran a la sombra de volcanes activos. De manera similar, muchas regiones agrícolas de primera en el oeste de los Estados Unidos tienen suelos fértiles total o mayoritariamente de origen volcánico.

Depósitos minerales

La mayoría de los minerales metálicos extraídos en el mundo, como el cobre, el oro, la plata, el plomo y el zinc, están asociados con magmas que se encuentran en las profundidades de las raíces de los volcanes extintos ubicados por encima de las zonas de subducción. El magma ascendente no siempre llega a la superficie para hacer erupción; en cambio, puede enfriarse y endurecerse lentamente debajo del volcán para formar una amplia variedad de rocas cristalinas (generalmente llamadas rocas *plutónicas* o *graníticas*). Algunos de los mejores ejemplos de estas rocas graníticas profundamente asentadas, luego expuestas por la erosión, se exhiben ostentosamente en el Parque Nacional Yosemite de California. Los depósitos de mineral se forman comúnmente alrededor de los cuerpos de magma que alimentan a los volcanes porque hay un suministro de calor disponible, que se mueve por convección y hace circular los fluidos que contienen minerales. Los metales, originalmente dispersos en pequeñas cantidades en el magma o en las rocas sólidas circundantes, se concentran mediante la circulación de fluidos calientes y pueden volver a depositarse, en condiciones favorables de temperatura y presión, para formar ricas vetas minerales.

Las chimenes volcánicas activas, a lo largo de las crestas oceánicas en expansión, crean entornos ideales para la circulación de fluidos ricos en minerales y para la deposición de minerales. Agua a una temperatura de 380 °C brota de los manantiales geotérmicos a lo largo de los centros de expansión. El agua se ha calentado durante la circulación por contacto con las rocas volcánicas calientes que forman la cresta. Las aguas termales de aguas profundas que contienen una gran cantidad de minerales de color oscuro (sulfuros) de hierro, cobre, zinc, níquel y otros metales se denominan "fumarolas negras". En raras ocasiones, estos depósitos de minerales de aguas profundas quedan expuestos como restos de la antigua corteza oceánica, raspados y depositados en las playas de la corteza continental ("varados") durante procesos de subducción posteriores. El macizo de Troodos en la isla de Chipre es, quizás, el ejemplo más conocido de una corteza oceánica tan antigua. Chipre era una importante fuente de cobre en el mundo antiguo y los romanos llamaban al cobre el "metal chipriota"; la palabra latina para cobre es *cuprium*.

Combustibles fósiles

El petróleo y el gas natural son productos del enterramiento profundo y la descomposición del material orgánico, acumulado en las cuencas geológicas que flanquean las cadenas montañosas formadas por procesos de tectónica de placas. El calor y la presión en profundidad transforman el material or-

gánico descompuesto en pequeñas bolsas de gas y petróleo líquido, que luego migran a través de los poros y aberturas más grandes de las rocas circundantes y se acumulan en depósitos, generalmente dentro de los 5 km de la superficie de la Tierra. El carbón es también un producto de restos acumulados de plantas descompuestas, que luego se entierran y compactan debajo de los sedimentos superpuestos. La mayor parte del carbón se originó como turba en pantanos antiguos creados hace muchos millones de años, asociados con el drenaje y la inundación de masas terrestres, causados por cambios en el nivel del mar relacionados con el movimiento de placas tectónicas y otros procesos geológicos. Por ejemplo, los depósitos de carbón de los Apalaches se formaron hace unos 300 millones de años en una cuenca baja que se inundaba y drenaba alternativamente.



Half Dome visto desde Glacier Point, Parque Nacional Yosemite, se eleva más de un kilómetro sobre el suelo del valle. Las rocas graníticas que forman Half Dome y otras características espectaculares del parque representan magma no erupcionado que luego quedó expuesto por la erosión profunda y la glaciación. (Fotografía de Carroll Ann Hodges, USGS).

Energía geotérmica

La energía geotérmica se puede aprovechar a partir del calor natural de la Tierra asociado a volcanes activos, o a volcanes jóvenes geológicamente inactivos pero que emiten calor en profundidad. El vapor de los fluidos geotérmicos de alta temperatura se puede utilizar para impulsar turbinas y generar energía eléctrica, mientras que los fluidos de temperatura más baja proporcionan agua caliente para calentar espacios, calor para invernaderos y usos industriales, y fuentes tibias o calientes en balnearios turísticos. Por ejemplo, el calor geotérmico calienta más del 70 por ciento de los hogares en Islandia, y el *campo geotérmico* The Geysers en el norte de California produce suficiente electricidad para satisfacer las demandas de energía de San Francisco. Además de ser un recurso energético, algunas aguas geotérmicas también contienen azufre, oro, plata y mercurio que pueden recuperarse como un subproducto de la producción de energía.

Un desafío formidable

A medida que aumenta la población mundial y más países se industrializan, la demanda mundial de recursos minerales y energéticos seguirá creciendo. Debido a que la gente ha estado utilizando los recursos naturales durante milenios, la mayoría de los recursos minerales, de combustibles fósiles y geotérmicos de fácil localización ya han sido aprovechados. Por necesidad, el enfoque del mundo se ha vuelto a las regiones más remotas e inaccesibles del mundo, como el fondo del océano, los continentes polares y los recursos que se encuentran más profundos en la corteza terrestre. Encontrar y desarrollar dichos recursos sin dañar el medio ambiente presentará un desafío formidable en las próximas décadas. Un mejor conocimiento de la relación entre la tectónica de placas y los recursos naturales es esencial para enfrentar este desafío.



Planta de energía geotérmica en Los Geysers, cerca de la ciudad de Santa Rosa en el norte de California. El área de Geysers es el desarrollo geotérmico más grande del mundo. (Fotografía de JulieDonnelly–Nolan, USGS).

Los beneficios a largo plazo de la tectónica de placas deberían servirnos como un recordatorio constante de que el planeta Tierra ocupa un nicho único en nuestro sistema solar. La apreciación del concepto de la tectónica de placas y sus consecuencias ha reforzado la noción de que la Tierra es un todo integrado, no una colección aleatoria de partes aisladas. El esfuerzo global para comprender mejor este concepto revolucionario ha ayudado a unir a la comunidad de ciencias de la tierra y a subrayar los vínculos entre las muchas disciplinas científicas diferentes. A medida que entramos en el siglo XXI, cuando los recursos finitos de la Tierra se verán sometidos a una presión aún mayor por el crecimiento explosivo de la población, los científicos de la tierra deben esforzarse por comprender mejor nuestro planeta dinámico. Debemos volvernos más ingeniosos para cosechar los beneficios a largo plazo de la tectónica de placas, al mismo tiempo que enfrentamos sus impactos adversos a corto plazo, como terremotos y erupciones volcánicas.



Agricultor arando un exuberante arrozal en el centro de Java, Indonesia; el volcán Sundoro se ve al fondo. Las áreas de cultivo de arroz más apreciadas tienen suelos fértiles formados por la descomposición de depósitos volcánicos jóvenes. (Fotografía de Robert I. Tilling, USGS).



El monte Rainier, cubierto de nieve, un volcán de 4392 m de altura construido por procesos de placas tectónicas, domina la escena pastoral alrededor de Orting, Washington. Este valle es un lugar acogedor para que la gente viva, trabaje y juegue, pero también es muy vulnerable a los flujos de lodo destructivos que podrían generarse por la actividad eruptiva renovada en el Monte Rainier. La sociedad debe aprender a “coexistir” inteligentemente con los volcanes activos. (Fotografía de David E. Wieprecht, USGS).

Notas finales

Los siguientes trabajos brindan información adicional sobre temas no cubiertos en el folleto, o solo discutidos brevemente.

Attenborough, David, 1986, *The Living Planet*: British Broadcasting Corporation, 320 p. (Una versión narrativa e informativa de la serie de televisión de gran éxito sobre el movimiento de la tierra).

Coch, NK y Ludman, Allan, 1991, *Physical Geology*: Macmillan Publishing Company, Nueva York, 678 p. (Libro de texto universitario bien ilustrado que contiene excelentes capítulos sobre temas relacionados con la dinámica de la Tierra y la tectónica de placas).

Cone, Joseph, 1991, *Fire Under the Sea*: William Morrow and Company, Inc., Nueva York, 285 p. (tapa blanda). (Un resumen legible de la exploración oceanográfica y el descubrimiento de fuentes volcánicas calientes en el fondo del océano).

Decker, Robert y Decker, Barbara, 1989, *Volcanoes*: WH Freeman and Company, Nueva York, 285 p. (libro de bolsillo). (Una excelente introducción al estudio de los volcanes escrita en un estilo fácil de leer).

Duffield, WA, Sass, JH y Sorey, ML, 1994, *Tapping the Earth's Natural Heat*: US Geological Survey Circular 1125, 63 p. (Un libro a todo color que describe, en términos no técnicos, los estudios del USGS sobre los recursos geotérmicos, uno de los beneficios de la tectónica de placas, como fuente de energía sostenible y relativamente no contaminante).

Ernst, WG, 1990, *The Dynamic Planet*: Columbia University Press, Nueva York, 280 págs. (Un libro de texto completo de nivel universitario que incluye buenos capítulos sobre tectónica de placas y temas relacionados).

Heliker, Christina, 1990, *Volcanic and seismic hazards of the Island of Hawaii*: U.S. Geological Survey general-interest publication, 48 p. (Un folleto a todo color que resume los peligros volcánicos, sísmicos y de tsunamis).

Krafft, Maurice, 1993, *Volcanoes: Fire from the Earth*: Harry N. Abrams, Nueva York, 207 p. (tapa blanda). (Un manual básico bien ilustrado y no técnico sobre volcanes; Maurice Krafft y su esposa Katia fueron los fotógrafos de volcanes más destacados del mundo antes de morir durante la erupción del volcán Unzen en Japón en junio de 1991).

Lindh, AG, 1990, *la predicción del terremoto proviene de edad*: *Technology Review*, febrero/marzo, p.42–51. (Una buena introducción a las bases y técnicas utilizadas por los científicos para intentar predecir los terremotos).

McNutt, Steve, 1990, *Terremoto de Loma Prieta, 17 de octubre de 1989: Resumen*: *California Geology*, v. 43, no. 1, pág. 3–7. (Junto con el artículo complementario de DD Montgomery, brinda la información esencial sobre este destructivo terremoto a lo largo de la falla de San Andrés).

McPhee, John, 1993, *Assembling California*: Farrar, Straus, & Giroux, New York, 303 p. (Un fascinante relato del papel de la tectónica de placas en la geología de California, contado en el típico estilo McPhee de conversaciones con científicos).

Montgomery, DD, 1990, *Efectos del terremoto de Loma Prieta, octubre 17, 1989*: *California Geo-*

logy, v. 43, no. 1, pág. 8–13. (Junto con el artículo complementario de Steve McNutt, brinda información esencial sobre este destructivo terremoto a lo largo de la falla de San Andrés).

Ritchie, David, 1981, *The Ring of Fire*: New American Library, Nueva York, 204 p. (rústica). (Un relato popularizado de terremotos, volcanes y tsunamis que azotan con frecuencia las regiones del Pacífico).

Schulz, SS y Wallace, RE, 1989, *The San Andrés Fault*: US Geological Survey, publicación de interés general, 16 p. (Este pequeño folleto brinda información básica sobre la zona de falla de San Andrés, incluida una buena discusión sobre los terremotos que ocurren con frecuencia a lo largo de ella).

Simkin, Tom, Unger, JD, Tilling, RI, Vogt, PR y Spall, Henry, compiladores, 1994, *This Dynamic Planet*: mapa mundial de volcanes, terremotos, cráteres de impacto y placas tectónicas: 1 hoja, Servicio Geológico de EE. UU. (USGS). (Además de las características fisiográficas visualmente obvias del mapa que se relacionan con la tectónica de placas, el texto explicativo brinda un resumen conciso de cómo funciona la tectónica de placas).

Sullivan, Water, 1991, *Continents in Motion*: McGraw–Hill Book Co., New York, 430 pag. (Una revisión exhaustiva de los desarrollos que culminaron en la teoría de la tectónica de placas. Editor científico del *New York Times*, Sullivan es ampliamente considerado como el "decano" de los escritores científicos estadounidenses).

Tarback, Edward y Lutgens, Frederick, 1985, *Earth Ciencia*: Charles E. Merrill PublishingCo., Columbus, Ohio, 561 p. (Un libro de texto de geología de nivel universitario que contiene buenos capítulos sobre tectónica de placas y temas relacionados).

Tilling, RI, 1991, *Born of fire: Volcanoes and igneous rocks*: Enslow Publishers, Inc., Hillside, New Jersey, 64 p. (Un texto introductorio sobre los tipos de volcanes y sus productos e impactos peligrosos, dirigido aproximadamente a nivel de secundaria a preparatoria).

Tilling, RI, Heliker, C., and Wright, TL, 1987, *Eruptions of Hawaiian Volcanoes: Past, present and future*: Publicación de interés general del Servicio Geológico de EE. UU., 54 p. (Resumen no técnico, ilustrado con muchas fotografías en color, de los abundantes datos sobre el vulcanismo hawaiano; formato similar al de este libro).

Tilling, RI, Topinka, Lyn y Swanson, DA, 1990, *Eruptions of Mount St. Helens: Past, present, and future*: publicación de interés general del Servicio Geológico de EE. UU., 56 p. (Un resumen no técnico, ilustrado con muchas fotografías a color y diagramas, de los abundantes datos científicos disponibles sobre el volcán, con énfasis en la erupción catastrófica del 18 de mayo de 1980; formato similar al de este libro).

Time–Life Books Inc., 1982, *Volcano: 1983*, *Continents in Collision*, en *Planet Earth Series*: Alexandria, Virginia, Time–Life Books, 176 p. cada uno. (Encuestas informativas y generales sobre vulcanismo y tectónica de placas).

Wright, TL y Pierson, TC, 1992, *Viviendo con volcanes*: US Geological Survey Circular, 57 p. (Un resumen no técnico del Programa de riesgos volcánicos del USGS, que destaca los estudios científicos utilizados para pronosticar erupciones y evaluar los riesgos volcánicos, en los Estados Unidos y en el extranjero).

Esta publicación forma parte de una serie de publicaciones de interés general preparadas por el Servicio Geológico de EE. UU. proporcionar información sobre las ciencias de la tierra, los recursos naturales y el medio ambiente. Para obtener un catálogo de títulos adicionales en la serie "Publicaciones de interés general del Servicio Geológico de EE. UU.", escriba a:

Servicio Geológico de EE. UU.
Rama de Servicios de Información
P.O. Box 25286, Denver, CO 80225

La versión impresa de este libro se puede solicitar directamente al Servicio Geológico de EE. UU.:

USGS Information Services
Box 25286, Building 810
Denver Federal Center, Denver, CO 80225
303-202-4700; Fax 303-202-4693

O llame sin cargo al 1-888-ASK-USGS.

Visite los Centros de Información de Ciencias de la Tierra del Servicio Geológico de EE. UU.

Como la principal agencia de conservación de la nación, el Departamento del Interior tiene la responsabilidad de la mayoría de nuestras tierras públicas y recursos naturales y culturales de propiedad nacional. Esto incluye fomentar el uso racional de nuestros recursos de tierra y agua; proteger nuestros peces, la vida silvestre y la diversidad biológica; preservar los valores ambientales y culturales de nuestros parques nacionales y lugares históricos; y proporcionar el disfrute de la vida a través de la recreación al aire libre. El Departamento evalúa nuestros recursos energéticos y minerales y trabaja para asegurar que su desarrollo sea en el mejor interés de toda nuestra gente fomentando la administración y la participación ciudadana en su cuidado. El Departamento también tiene la responsabilidad principal para las reservas y comunidades de Indios Americanos y para las personas que viven en territorios insulares bajo la administración de los EE.UU.