

experimentar fractura o deslizamiento friccional. Con el desarrollo de la teoría de la tectónica de placas, se proporcionó a los investigadores un nuevo campo para explorar este antiguo problema. Las pruebas experimentales indican que una placa descendente fría puede calentarse tan despacio que llegue a fracturarse a profundidades de hasta 300 kilómetros. Por tanto, los terremotos de foco medio podrían generarse de una manera similar a los superficiales, es decir, a través de la liberación de energía elástica a lo largo de una superficie de falla. Pero, ¿qué causa los terremotos profundos?

Los mecanismos responsables de los terremotos que ocurren a profundidades comprendidas entre 300 y 690 kilómetros se nos siguen escapando. Una hipótesis que ha conseguido un apoyo sustancial se basa en que, durante la subducción, las presiones crecientes hacen que algunos minerales, como el olivino, atraviesen un cambio de fase. Un cambio de fase hace que un mineral tenga una estructura cristalina más compacta. Se ha sugerido que, esta transformación, cuando se produce en el interior más frío de una placa, causa un tipo de falla de alta presión, que a su vez, produce un terremoto de foco profundo.

Con objeto de comprobar ésta y otras propuestas, los investigadores están reproduciendo las condiciones del manto utilizando yunques especialmente diseñados que pueden aplicar presiones enormes a muestras diminutas de rocas entre dos diamantes. Las muestras se calientan haciendo pasar un láser a través de uno de los diamantes, y se utilizan sensores para detectar acontecimientos acústicos que, se cree, son análogos a los terremotos. Aunque estos estudios son preliminares, indican que a presiones y temperaturas elevadas, es probable que los minerales se rompan por medio de un deslizamiento de la manera prevista.

Aunque la causa exacta de los terremotos de foco profundo sigue debatiéndose, su estrecha asociación con las zonas de subducción está bien documentada. Dado que las zonas de subducción son las únicas regiones donde las rocas frías de la corteza se ven forzadas a descender a grandes profundidades, deben ser los únicos lugares donde se produzcan los terremotos de foco profundo. De hecho, la ausencia de terremotos de foco profundo a lo largo de bordes divergentes y transformantes apoya la teoría de la tectónica de placas.

Pruebas procedentes de sondeos oceánicos

Algunas de las pruebas más convincentes que confirman la expansión del fondo oceánico proceden directamente de los sondeos en los sedimentos del fondo oceánico. Desde 1968 hasta 1983, la fuente de estos importantes

datos era el Deep Sea Drilling Project, un programa internacional promocionado por varias instituciones oceanográficas importantes y la National Science Foundation. El objetivo fundamental era recoger información de primera mano sobre la edad y los procesos que formaron las cuencas oceánicas.

Para llevarlo a cabo, se construyó un buque para realizar sondeos marinos, el *Glomar Challenger*. Este barco representó un avance tecnológico significativo; era capaz de bajar miles de metros de tuberías de perforación al fondo oceánico y allí taladrar centenares de metros en los sedimentos y la corteza basáltica subyacentes.

Las operaciones empezaron en agosto de 1968, en el Atlántico sur. En varios sitios, se sondeó a través de todo el grosor de los sedimentos hasta la roca basáltica inferior. Un importante objetivo era recoger muestras del sedimento situado justo por encima de la corteza ígnea como un medio para datar el fondo oceánico en cada lugar.* Dado que la sedimentación empieza inmediatamente después de que se forma la corteza oceánica, los restos de microorganismos encontrados en los sedimentos más antiguos (los que reposan directamente en el basalto) pueden utilizarse para datar el fondo oceánico en ese lugar.

Cuando se representó la edad de los sedimentos más antiguos de cada punto de perforación frente a su distancia con respecto a la cresta de la dorsal, la representación demostró que la edad del sedimento aumentaba a medida que lo hacía la distancia desde la dorsal. Este hallazgo coincidía con la hipótesis de expansión del fondo oceánico, que predecía que la corteza oceánica más joven se encontraría en la cresta de la dorsal, y que la corteza oceánica más antigua estaría en los márgenes continentales.

Además, la velocidad de expansión del fondo oceánico, determinada a partir de las edades de los sedimentos, era idéntica a la velocidad previamente calculada a partir de las pruebas magnéticas. La perforación subsiguiente en el océano Pacífico verificó esos hallazgos. Esas excelentes correlaciones proporcionaron una notable confirmación de la expansión del fondo oceánico.

Los datos procedentes del Deep Sea Drilling Project reforzaron también la idea de que las cuencas oceánicas son geológicamente jóvenes, porque no se encontró sedimento de edades superiores a los 160 millones de años. Por comparación, se ha datado corteza continental con una edad que supera los 4.000 millones de años.

El grosor de los sedimentos del fondo oceánico proporcionó una verificación adicional de su expansión. Las muestras de perforación del *Glomar Challenger* reve-

*Las dataciones radiométricas de la corteza oceánica en sí mismas no son fiables debido a la alteración del basalto por el agua del mar.

laron que los sedimentos están casi por completo ausentes en la cresta de la dorsal y que el grosor de los sedimentos aumenta con la distancia a la dorsal. Debido a que la cresta de la dorsal es más joven que las áreas que están más alejadas de ella, cabe esperar este modelo de distribución de los sedimentos si la hipótesis de expansión del fondo oceánico es correcta.

Además, las determinaciones en el mar abierto han demostrado que los sedimentos se acumulan a una velocidad de aproximadamente un centímetro cada mil años. Por consiguiente, si el fondo oceánico fuera antiguo, los sedimentos tendrían muchos kilómetros de grosor. Sin embargo, los datos procedentes de centenares de puntos de perforación indican que el grosor mayor de los sedimentos en las cuencas submarinas es de tan sólo unos pocos centenares de metros, lo que equivale a intervalos de tan sólo unos pocos decenios de millones de años. Por tanto, éste es un dato adicional que confirma el hecho de que el fondo oceánico es una estructura geológica joven.

Durante sus 15 años de funcionamiento, el *Glomar Challenger* recorrió más de 600.000 kilómetros en 96 viajes a través de todo el océano. La perforación de 1.092 sondeos produjo más de 96 kilómetros de muestras de valor incalculable. Aunque el Deep Sea Drilling Project finalizó y el *Glomar Challenger* fue retirado, todavía continúa el importante trabajo de obtención de muestras de los fondos de las cuencas oceánicas mundiales.

El Ocean Drilling Project sucedió al Deep Sea Drilling Project y, como su predecesor, es un importante programa internacional. El buque perforador más avanzado desde el punto de vista tecnológico, el *JOIDES Resolution* continúa ahora el trabajo del *Glomar Challenger*[†]. El *JOIDES Resolution* puede perforar en aguas profundas de hasta 8.100 metros y contiene laboratorios a bordo equipados con grandes y variados equipos de investigación científica (Figura 19.27).

[†]Las siglas JOIDES proceden de Joint Oceanographic Institutions for Deep Earth Sampling.



Figura 19.27 El *JOIDES Resolution*, el buque para realizar sondeos del Ocean Drilling Program. Este moderno buque perforador ha sustituido al *Glomar Challenger* en el importante trabajo de tomar muestras de los fondos de los océanos mundiales. (Foto cortesía de Ocean Drilling Program).

Puntos calientes

La cartografía de los montes submarinos del océano Pacífico reveló una cadena de estructuras volcánicas que se extendía desde las islas Hawaii a la isla Midway y continuaba hacia el norte, hacia la fosa de las Aleutianas (Figura 19.28). La datación radiométrica de esta cadena demostró que la edad de los volcanes aumenta a medida que se distancian de Hawaii. Hawaii, el volcán más joven de la cadena, se elevó del fondo oceánico hace menos de un millón de años, mientras que la isla Midway tiene 27 millones de años y el monte submarino Suiko, cerca de la fosa de las Aleutianas, tiene 65 millones de años (Figura 19.28).

Los investigadores han propuesto la existencia de una pluma ascendente de material del manto debajo de la isla de Hawaii. La fusión parcial de esta roca caliente a

medida que entra en un entorno de baja presión cercano a la superficie genera un área volcánica conocida como **punto caliente**. Probablemente, conforme la placa del Pacífico se movió sobre este punto caliente, se formaron estructuras volcánicas sucesivas. La edad de cada volcán indica el momento en el que se situó sobre la pluma del manto relativamente estacionaria.

Este modelo se muestra en la Figura 19.28. Kauai es la más antigua de las grandes islas de la cadena hawaiana. Hace 5 millones de años, cuando estaba colocada sobre el punto caliente, Kauai era la única isla hawaiana (Figura 19.28). Examinando sus volcanes extintos, que han sido erosionados en picos dentados y enormes cañones, pueden verse las pruebas de la edad de Kauai. Por el contrario, las suaves pendientes meridionales de la isla de

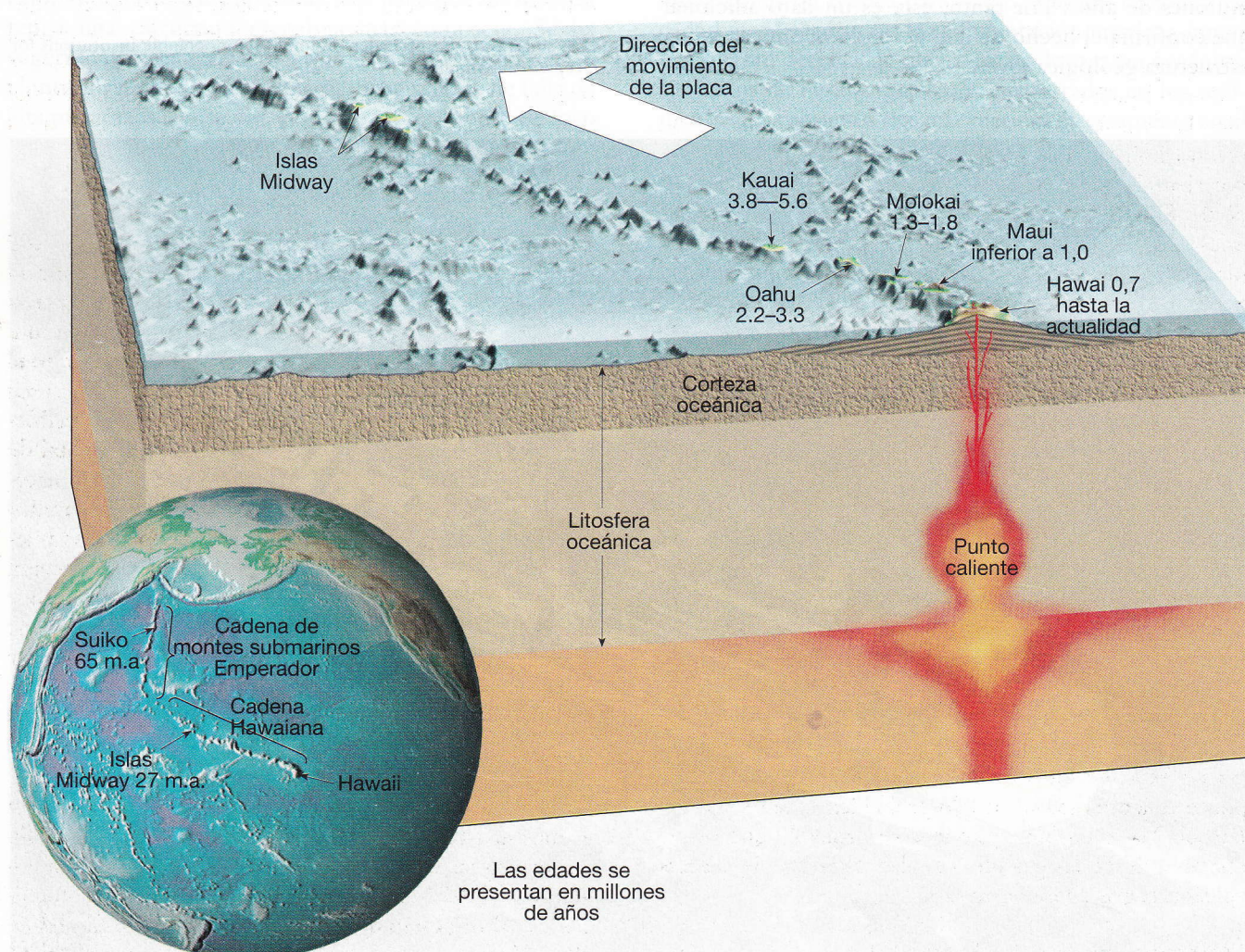


Figura 19.28 La cadena de islas y de montañas sumergidas que se extiende desde Hawaii a la fosa de las Aleutianas se produce por el movimiento de la placa del Pacífico sobre un punto caliente aparentemente estacionario. La datación radiométrica de las islas Hawaii pone de manifiesto que la edad de la actividad volcánica disminuye conforme nos acercamos a la isla de Hawaii.

Hawaii, comparativamente joven, consisten en coladas de lava fresca, y dos de los volcanes de Hawaii, el Mauna Loa y el Kialuea, siguen activos.

Las evidencias recientes indican que se está formando una nueva pila volcánica denominada Loihi Seamount, en el fondo oceánico a unos 35 kilómetros de la costa sureste de Hawaii. Hablando desde un punto de vista geológico, no tardará mucho en añadirse otra isla tropical a la cadena hawaiana.

Dos grupos de islas corren paralelas a la cadena islas Hawaii-Emperador. Una cadena consiste en las islas Tuamotu y Line, y la otra en las islas Austral, Gilbert y Marshall. En cada caso, la actividad volcánica más reciente se ha producido en el extremo suroriental de la cadena, y las islas son progresivamente más antiguas hacia el norte occidental. Por tanto, como la cadena de islas Hawaii-Emperador, esas estructuras volcánicas se formaron aparentemente por el mismo movimiento de la placa del Pacífico sobre plumas del manto fijas. Esta prueba, no sólo apoya el hecho de que las placas se mueven en realidad en relación con el interior de la Tierra, sino que también las "huellas" del punto caliente marcan la dirección del movimiento de la placa. Obsérvese en la Figura 19.28, por ejemplo, que la cadena de islas Hawaii-Emperador se dobla. Esta flexión particular de la traza se produjo hace unos 40 millones de años, cuando el movimiento de la placa del Pacífico cambió desde una dirección casi norte a una dirección noroeste. De igual forma, los puntos calientes localizados en el fondo del Atlántico han aumentado nuestro conocimiento sobre la migración de las masas de tierra después de la fragmentación del Pangea.

Aunque la existencia de plumas en el manto está bien documentada, su papel exacto en la tectónica de placas es un tema de investigación continua. Algunos investigadores sugieren que las plumas del manto se originan en zonas profundas de este último, quizá en el límite núcleo-manto. La mayoría de las pruebas indica que los puntos calientes permanecen relativamente estacionarios. De los 50 a 120 puntos calientes que existen, una docena más o menos están localizados cerca de bordes de placa divergentes. Un punto caliente situado debajo de Islandia es probablemente responsable de la acumulación anormalmente grande de rocas volcánicas que se encuentra en esta sección de la dorsal Centroatlántica. Otro punto caliente está localizado probablemente debajo del Parque Nacional Yellowstone y es probable que sea el responsable de las grandes coladas de lava y de cenizas volcánicas que cubren este área.

Pangea: antes y después

Se ha recogido una gran cantidad de pruebas que apoyan el hecho de que el supercontinente Pangea, de Alfred

Wegener, empezó a separarse hace unos 200 millones de años. Una consecuencia importante de esta deriva continental fue la creación de una "nueva" cuenca oceánica, el Atlántico. La fragmentación de Pangea y la formación de la cuenca del océano Atlántico se produjeron aparentemente a lo largo de un lapso de casi 160 millones de años. La última fase, la separación de Groenlandia y Eurasia, empezó sólo hace unos 50 millones de años.

Aunque la formación de rifts continentales está bien documentada, queda por resolver una cuestión: ¿qué hace que un continente se separe? Los investigadores han sugerido que, cuando un gran fragmento de litosfera continental permanece estacionario durante un periodo prolongado de tiempo, las condiciones son adecuadas para la formación de un rift continental. Dado que la corteza continental es un mal conductor del calor, actúa como una gruesa manta retardando el flujo ascendente de calor desde el manto. Por tanto, la acumulación de calor hace que el supercontinente se abombe. Esta actividad genera fuerzas de extensión que disminuyen el grosor y, finalmente, rompen la litosfera. El ascenso de material caliente entre los fragmentos continentales separados genera un nuevo fondo oceánico.

Fragmentación de Pangea

La fragmentación de Pangea empezó hace unos 200 millones de años. En la Figura 19.29 se ilustra la ruptura y los subsiguientes caminos emprendidos por las masas de tierra. Como puede verse fácilmente en la Figura 19.29B, dos rifts principales iniciaron la ruptura. La zona de rift entre Norteamérica y África generó numerosos derrames de basaltos jurásicos. Esos basaltos son visibles en la actualidad a lo largo del borde litoral oriental de Estados Unidos. La datación radiométrica de este material indica que la separación empezó entre los 200 millones y los 165 millones de años. Este lapso de tiempo puede utilizarse como la fecha de nacimiento de esta sección del Atlántico norte. El rift que se formó en las masas continentales meridionales de Gondwana desarrolló una fractura con forma de Y, que envió India hacia el norte y separó, simultáneamente, Sudamérica-África de Australia-Antártida.

La Figura 19.29C ilustra la posición de los continentes hace 135 millones de años, aproximadamente, cuando empezaron a separarse África y Sudamérica para formar el Atlántico sur. Puede verse la India a medio camino en su viaje hacia Asia, mientras que la porción meridional del Atlántico norte se ha agrandado notablemente. Al principio del Cenozoico, hace 65 millones de años, Madagascar se había separado de África, y el Atlántico sur había emergido como un océano completamente desarrollado (Figura 19.29D). A esta sazón, la India se había desplazado sobre un punto caliente que generó

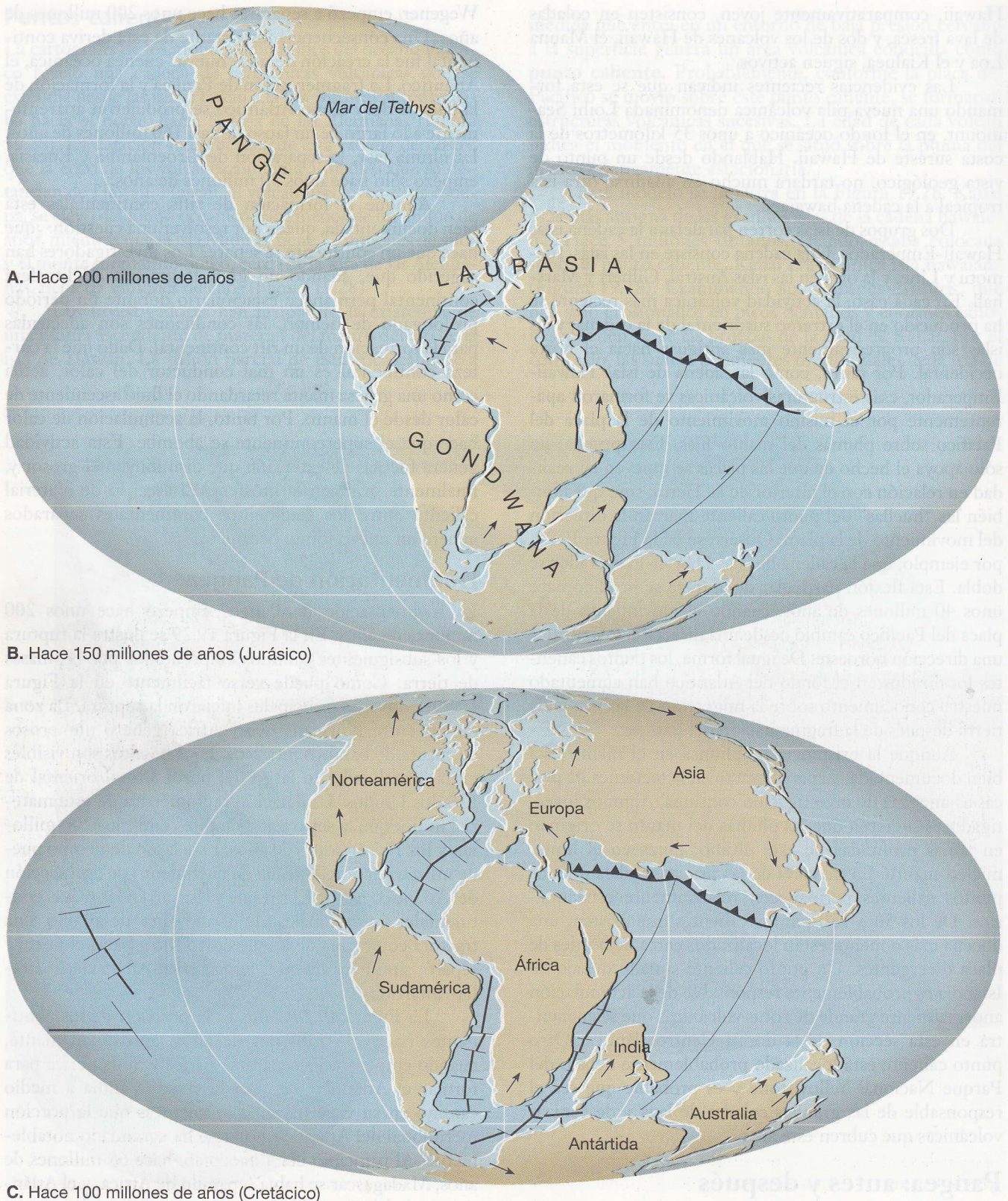
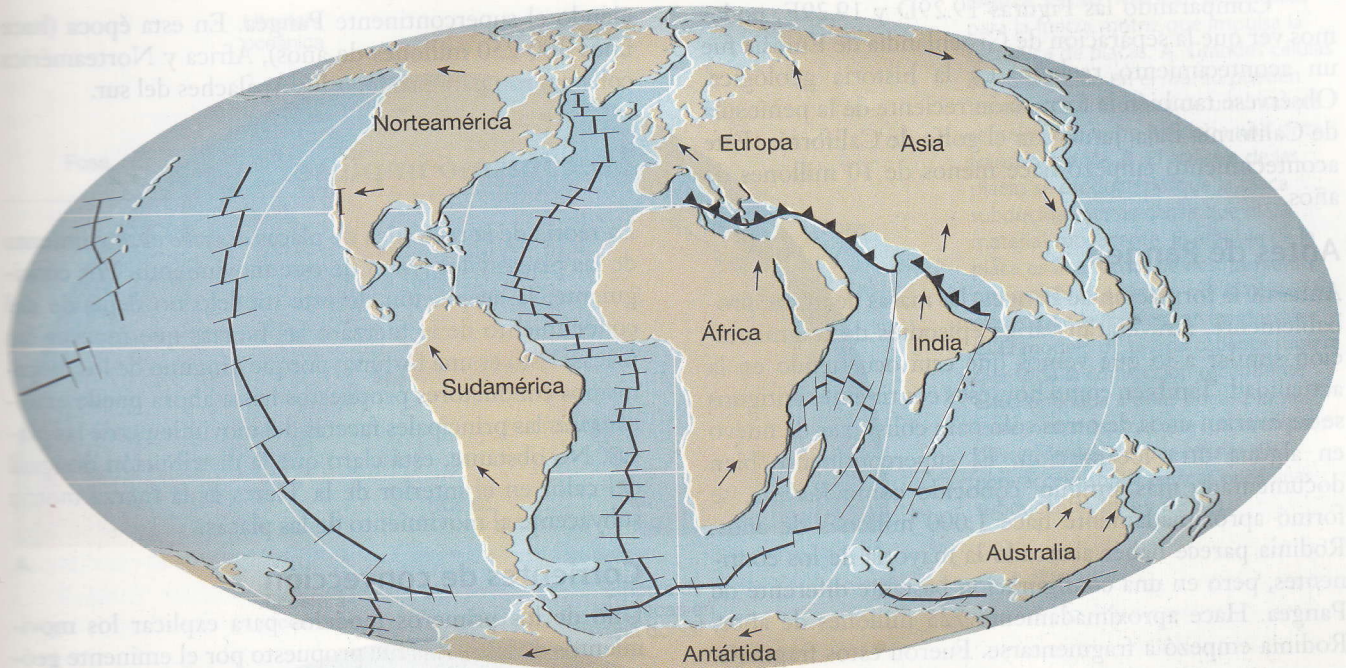
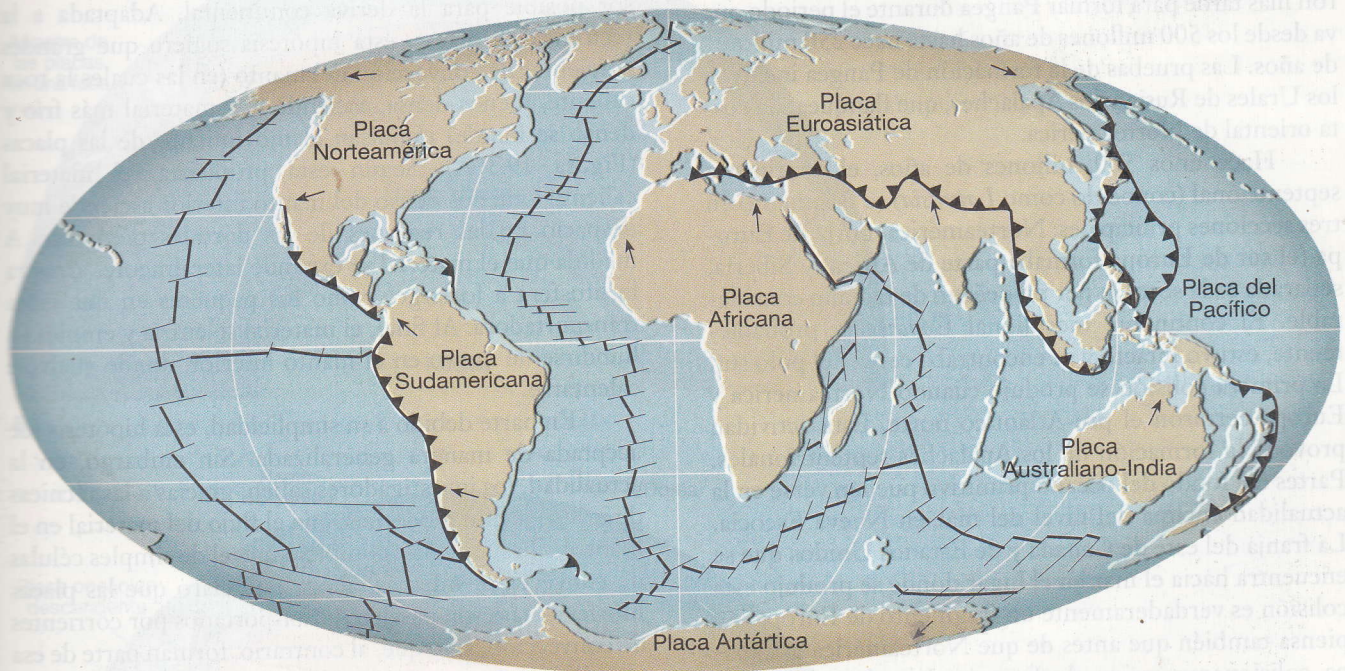


Figura 19.29 Varias vistas de la fragmentación de Pangea a lo largo de un periodo de 200 millones de años.



D. Hace 50 millones de años



E. Presente

numerosas coladas basálticas muy fluidas en una región del oeste de la India denominada ahora la meseta de Deccan. Esas coladas de lava son muy similares a las que constituyen la llanura de Columbia, en Estados Unidos.

Un mapa moderno (Figura 19.29E) muestra la India en contacto con Asia, un acontecimiento que empezó hace unos 45 millones de años y creó las monta-

ñas más altas de la Tierra, la cordillera del Himalaya, junto con las tierras altas tibetanas. Es interesante observar que la altura media de Tíbet es de 5.000 metros, mayor que cualquier punto de Estados Unidos. La migración continua de la India hacia el norte produce los numerosos y a menudo destructivos terremotos que asolan esta parte del mundo.