

CAPÍTULO 15

Procesos gravitacionales: la fuerza de la gravedad

**Un desastre provocado
por un deslizamiento en Perú**

**Procesos gravitacionales y desarrollo
de las formas del terreno**

Papel de los procesos gravitacionales
Las pendientes cambian con el tiempo

**Controles y desencadenantes
de los procesos gravitacionales**

Papel del agua
Pendientes sobreempinadas
Eliminación de la vegetación
Terremotos como desencadenantes
¿Deslizamientos sin desencadenantes?

**Clasificación de los procesos
gravitacionales**

Tipo de material

Tipo de movimiento
Velocidad de movimiento

Desplomes

Deslizamiento de rocas

Flujo de derrubios

Flujos de derrubios en las regiones
semiáridas
Lahares

Flujos de tierra

Movimientos lentos

Reptación
Soliflucción

Deslizamientos submarinos

La superficie de la Tierra nunca es perfectamente plana, sino que consiste en laderas de muchas variedades diferentes. Algunas son empinadas y escarpadas; otras son moderadas o suaves. Algunas son largas y graduales; otras, cortas y abruptas. Las laderas pueden estar cubiertas de un manto de suelo y vegetación o consistir en roca estéril y escombros. En conjunto, las laderas son los elementos más comunes de nuestro paisaje físico. Algunas laderas pueden parecer estables e invariables, pero la fuerza de la gravedad hace que los materiales se desplacen pendiente abajo. En un extremo, el movimiento puede ser gradual y prácticamente imperceptible. En el otro, puede consistir en un flujo ruidoso de derrubios o una estruendosa avalancha de rocas. Los deslizamientos de tierras son un peligro natural en todo el mundo. Cuando estos procesos peligrosos llevan a la pérdida de vidas y propiedades, se convierten en desastres naturales.

Un desastre provocado por un deslizamiento en Perú

Periódicamente oímos noticias que relatan los detalles terroríficos, y a veces siniestros, de los deslizamientos de tierras. El 31 de mayo de 1970 se produjo uno de estos sucesos cuando una avalancha gigantesca de rocas enterró a más de 20.000 personas de Yungay y Ranrahirca, Perú (Figura 15.1). Hubo pocas advertencias del desastre inminente; empezó y finalizó en cuestión de minutos. La avalancha se inició a unos 14 kilómetros de Yungay, cerca de la cima de 6.700 metros del Nevado Huascarán, el pico más elevado de los Andes peruanos. Desencadenado por el movimiento de tierra de un fuerte terremoto a poca distancia de la costa, se produjo el desprendimiento de una enorme masa de roca y hielo de la escarpada cara norte de la montaña. Después de precipitarse casi un kilómetro, el material quedó pulveriza-

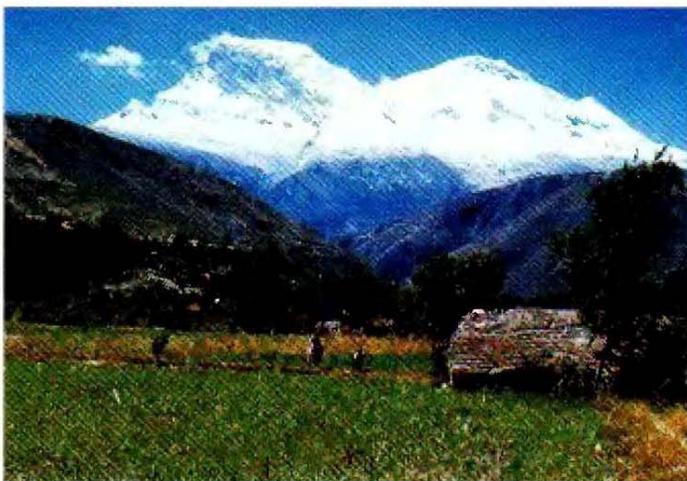
do tras el impacto, e inmediatamente empezó a descender impetuosamente por la ladera de la montaña convertido en un fluido debido al aire atrapado y al hielo fundido.

Los derrubios que caían arrancaron desatados millones de toneladas de derrubios, adicionales conforme descendían ladera abajo con estruendo. Se generaron vientos huracanados a medida que el aire comprimido escapaba de debajo de la masa de la avalancha produciendo un ruido atronador y despejando las laderas cercanas de vegetación. Aunque el material seguía una garganta previamente erosionada, una porción de los derrubios saltó un puente de roca de unos 200 a 300 metros que había protegido Yungay de acontecimientos similares en el pasado y enterró la ciudad entera. Después de destruir otro pueblo en su camino, Ranrahirca, la masa de derrubios alcanzó por fin el fondo del valle. Allí, su ímpetu le permitió atravesar el río Santa Ana y ascender decenas de metros de la pared del valle en el lado opuesto.

Éste no fue el primer desastre de este tipo que ocurrió en la región y, probablemente, no será el último. Tan sólo hace ocho años, una avalancha menos espectacular, pero devastadora, se cobró las vidas de unas 3.500 personas en un valle densamente poblado situado en la base de la montaña. Por fortuna, movimientos de masas como el que se acaba de describir son infrecuentes y sólo ocasionalmente afectan a un gran número de personas.

Procesos gravitacionales y desarrollo de las formas del terreno

Los deslizamientos de tierra son ejemplos espectaculares de acontecimientos geológicos fundamentales denominados procesos gravitacionales. Por **procesos gravitacio-**



A.



B.

▲ **Figura 15.1** Una avalancha de rocas provocada por un terremoto próximo a la costa devastó este valle peruano en mayo de 1970. A. Antes. B. Después de la avalancha de rocas. (Fotos cortesía de Iris Lozier.)

nales se entienden los movimientos pendiente abajo de roca, regolito y suelo, bajo la influencia directa de la gravedad. Se diferencian de los procesos erosivos que se examinarán en los capítulos siguientes porque los procesos gravitacionales no precisan un medio de transporte como el agua, el viento o el hielo de los glaciares.

Papel de los procesos gravitacionales

En la evolución de la mayoría de las formas del paisaje, los procesos gravitacionales constituyen la etapa consecutiva a la meteorización. En sí misma, la meteorización no produce formas significativas de paisaje. Éstas se desarrollan conforme los productos de la meteorización son retirados de los lugares donde se originaron. Una vez que la meteorización debilita y disgrega la roca, los procesos gravitacionales transfieren los derrubios pendiente abajo, donde una corriente, que actúa como una cinta transportadora, normalmente se los lleva. Aunque puede haber muchas paradas intermedias a lo largo del camino, el sedimento acaba por ser transportado a su destino final: el mar.

Los efectos combinados de los procesos gravitacionales y las aguas de escorrentía producen valles fluviales, que son los paisajes más comunes y llamativos de la Tierra. Si sólo las corrientes fueran responsables de la creación de los valles por los que fluyen, aquéllos serían muy estrechos. Sin embargo, el hecho de que la mayoría de los valles fluviales sean más anchos que profundos es una fuerte indicación de la importancia de los procesos gravitacionales con respecto al suministro de material a las corrientes. Esto se pone de manifiesto en el Gran Cañón. Las paredes del cañón se extienden bastante más allá del río Colorado debido a la transferencia de derrubios meteorizados pendiente abajo hacia el río y sus afluentes por procesos gravitacionales. De esta manera, las corrientes y los procesos gravitacionales se combinan para modificar y esculpir la superficie. Por supuesto, los glaciares, las aguas subterráneas, las olas y el viento son también agentes importantes en el modelado de las formas y desarrollo de los paisajes.

Las pendientes cambian con el tiempo

Está claro que si tienen que producirse procesos gravitacionales, debe haber pendientes por las que las rocas, el suelo y el regolito puedan descender. Los procesos volcánicos y de formación de montañas de la Tierra son los que producen estas pendientes a través de cambios esporádicos en las elevaciones de las masas continentales y el fondo oceánico. Si los procesos dinámicos internos no produjeran continuamente regiones con mayores elevaciones, el sistema que mueve los derrubios a cotas menores iría perdiendo velocidad de manera gradual y acabaría desapareciendo.

Los procesos gravitacionales más rápidos y espectaculares tienen lugar en zonas montañosas accidentadas y geológicamente jóvenes. Los ríos y los glaciares erosionan rápidamente las montañas recién formadas y las convierten en regiones caracterizadas por pendientes escarpadas e inestables. En lugares como éstos se producen los deslizamientos de tierra masivos y destructivos, como el desastre de Yungay. Cuando disminuye la formación de montañas, los procesos gravitacionales y erosivos rebajan el terreno. Con el tiempo, las pendientes escarpadas y accidentadas de las montañas dan lugar a un terreno menos pronunciado, más suave. Por tanto, a medida que el paisaje envejece, los procesos gravitacionales masivos y rápidos dan lugar a movimientos pendiente abajo más pequeños, menos espectaculares.

Controles y desencadenantes de los procesos gravitacionales



Procesos gravitacionales ▼ Controles y desencadenantes de los procesos gravitacionales

La gravedad es la fuerza que controla los procesos gravitacionales, pero varios factores desempeñan un papel importante en cuanto a la superación de la inercia y la creación de movimientos descendentes. Mucho antes de que se produzca un deslizamiento, varios procesos actúan para debilitar el material de la pendiente, convirtiéndolo de una manera gradual en un material cada vez más susceptible a la fuerza de la gravedad. Durante este período, la pendiente permanece estable pero cada vez se aproxima más a la inestabilidad. Al final, la fuerza de la pendiente se debilita hasta el punto de que algo hace que cruce el umbral de la estabilidad a la inestabilidad. Un acontecimiento de este tipo que inicia el movimiento descendente se denomina *desencadenante*. Recordemos que el desencadenante no es la única causa del proceso gravitacional, sino sólo la última de muchas causas. Entre los factores comunes que desencadenan los procesos gravitacionales se cuentan la saturación en agua del material, el exceso de inclinación de las pendientes, la eliminación de la vegetación anclada y las vibraciones del suelo debidas a terremotos.

Papel del agua

A veces los procesos gravitacionales se desencadenan cuando las fuertes lluvias o los períodos de fusión de la nieve saturan los materiales de la superficie. Ése fue el caso en octubre de 1998, cuando las lluvias torrenciales asociadas con el huracán Mitch desencadenaron corrientes de barro devastadoras en Centroamérica.

Cuando los poros del sedimento se llenan de agua, se destruye la cohesión entre las partículas, permitiendo que se deslicen unas sobre otras con relativa facilidad. Por ejemplo, cuando la arena está ligeramente húmeda, se pega bastante bien. Sin embargo, si se añade suficiente agua como para llenar los huecos entre los granos, la arena se escurrirá poco a poco en todas las direcciones (Figura 15.2). Por tanto, la saturación reduce la resistencia interna de los materiales, los cuales son puestos fácilmente en movimiento por la fuerza de la gravedad. Cuando la arcilla está húmeda, se convierte en una masa muy suave: otro ejemplo del efecto «lubricante» del agua. El agua añade también considerable peso a una masa de material. El peso añadido puede ser suficiente en sí mismo para hacer que el material se deslice o fluya pendiente abajo.

Pendientes sobreempinadas

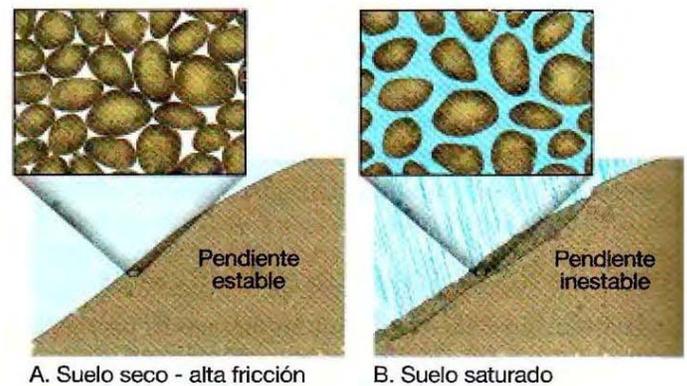
El exceso de pendiente es otra causa de muchos movimientos de masa. En la naturaleza hay muchas situaciones en las que hay exceso de pendiente. Una corriente fluvial que socava la pared de un valle y las olas que golpean contra la base de un acantilado no son sino dos ejemplos familiares. Además, a través de sus actividades, el ser humano crea a menudo pendientes sobreempinadas e inestables que se convierten en zonas principales de actuación de los procesos gravitacionales (véase Recuadro 15.1).

Las partículas granulares no consolidadas (granos del tamaño de la arena o más gruesos) adoptan una pendiente estable denominada **ángulo de reposo** (*repose* = descansar). Éste es el ángulo más empinado al cual el material se mantiene estable. Dependiendo del tamaño y la forma de las partículas, el ángulo oscila entre 25 y 40 grados. Los granos mayores y más angulosos mantienen las pendientes más empinadas. Si se aumenta el ángulo, los derrubios de roca se ajustarán desplazándose pendiente abajo.

El exceso de pendiente no es importante simplemente porque desencadene movimientos de materiales granulares no consolidados. Produce también pendientes inestables y movimientos de masa en suelos cohesivos, en regolito y en roca viva. La respuesta no será inmediata, como en el caso del material granular suelto, pero antes o después, uno o más procesos gravitacionales eliminarán la pendiente excesiva, restaurando su estabilidad.

Eliminación de la vegetación

Las plantas protegen contra la erosión y contribuyen a la estabilidad de las pendientes, porque sus sistemas radiculares unen el suelo y el regolito. Además, las plantas protegen la superficie del suelo de los efectos erosivos del impacto de las gotas de lluvia. Donde faltan plantas, se potencian los procesos gravitacionales, en especial si las



▲ **Figura 15.2** El efecto del agua en los procesos gravitacionales puede ser enorme. **A.** Cuando hay poca agua o no la hay, la fricción entre las empaquetadas partículas de suelo en la pendiente las mantiene en su lugar. **B.** Cuando el suelo está saturado, los granos son separados a la fuerza y la fricción se reduce, permitiendo que el suelo se mueva pendiente abajo.

pendientes son empinadas y el agua abundante. Cuando se elimina el anclaje de la vegetación, como consecuencia de los incendios forestales o de la actividad del hombre (tala de árboles, agricultura o urbanización), los materiales de superficie suelen desplazarse pendiente abajo.

Un ejemplo insólito que ilustra el efecto fijador de las plantas se produjo hace varias décadas en las empinadas pendientes próximas a Menton, Francia. Los agricultores sustituyeron olivos, que tiene raíces profundas, por una cosecha económicamente más rentable, pero de raíces superficiales: los claveles. Cuando se desplomó la pendiente menos estable, el corrimiento de tierras se cobró once vidas.

En julio de 1994, un gran incendio azotó la montaña Storm King, al oeste de Glenwood Springs, Colorado, y eliminó la vegetación de las pendientes. Dos meses después, las fuertes lluvias originaron numerosas corrientes de derrubios, una de las cuales bloqueó la Interestatal 70 y amenazó con hacer un dique en el río Colorado. Un tramo de 5 kilómetros de la autopista quedó inundado con toneladas de rocas, barro y árboles quemados. El cierre de la Interestatal 70 supuso retrasos costosos en esta autopista principal. Tras los extensos incendios acaecidos en el verano de 2000, tipos parecidos de procesos gravitacionales amenazan las autopistas y otras ampliaciones cercanas a las laderas devastadas por el fuego en el oeste de Estados Unidos.

Además de eliminar las plantas que fijan el suelo, el fuego puede fomentar los procesos gravitacionales de otras maneras. Después de un incendio forestal, la parte superior del suelo se vuelve seca y suelta. Como consecuencia, incluso con un tiempo seco, el suelo tiende a descender por las pendientes empinadas. Además, el fuego también puede «cocer» el suelo y crear una capa repelente



Recuadro 15.1 ▶ El hombre y el medio ambiente

El desastre de la presa de Vaiont

Al principio de este capítulo se describe una avalancha masiva de rocas en Perú. Como ocurre con la mayoría de los procesos gravitacionales, este trágico episodio fue desencadenado por un acontecimiento natural, en este caso, un terremoto. Sin embargo, los desastres también se producen como consecuencia del movimiento de masas de material superficial desencadenado por las acciones humanas.

En 1960, se construyó una gran presa, de casi 265 metros de altura, a través del cañón Vaiont en los Alpes italianos. Se construyó sin buenos datos geológicos y el resultado fue un desastre sólo tres años después.

El sustrato rocoso en el cañón Vaiont se inclinó abruptamente hacia abajo en dirección al lago retenido detrás de la presa. El lecho de roca estaba compuesto por estratos débiles de caliza muy fracturada, con capas de arcilla y numerosas cavidades de disolución. A medida que el embalse se llenó detrás de la presa ya finalizada, las rocas empezaron a saturarse en agua y las arcillas se hincharon y se volvieron más plásticas. El ascenso del agua redujo la fricción interna que había mantenido la roca en su lugar.

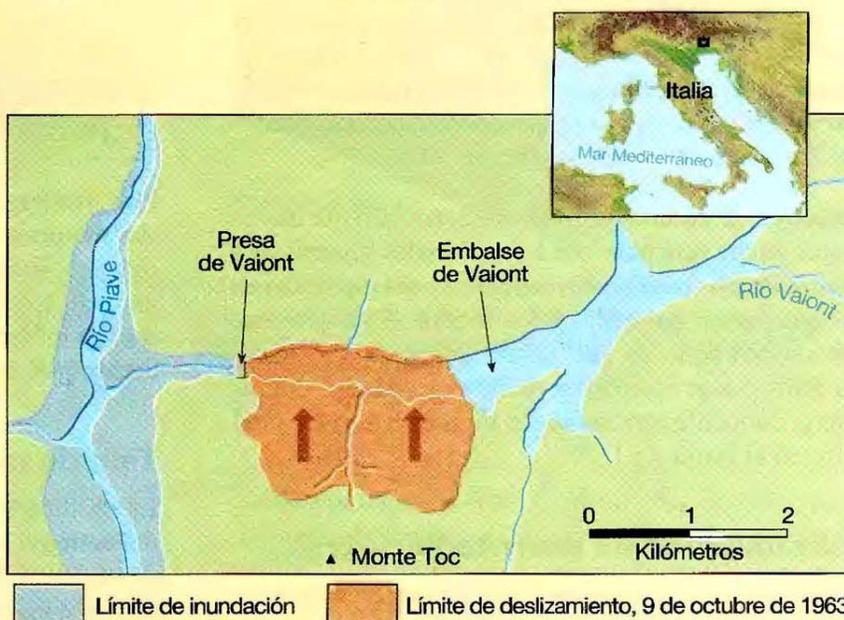
Las determinaciones realizadas poco después de llenar el embalse hacían alusión al problema, porque indicaron que una porción de la montaña reptaba lentamente colina abajo a una velocidad de un centímetro por semana. En septiembre de 1963, la velocidad aumentó a un centímetro por día, luego a 10-20 centímetros por día, y finalmente hasta 80

centímetros por día en la fecha del desastre.

Por último, la ladera de la montaña se desprendió. En tan sólo un instante, 240 millones de metros cúbicos de roca y derrubios se deslizaron ladera abajo y llenaron casi dos kilómetros de la garganta hasta alturas de 150 metros por encima del nivel del embalse (Figura 15.A). Esto empujó el agua completamente fuera del embalse en una ola de más de 90 metros de altura. A más de 1,5 kilómetros corriendo abajo, el muro de agua seguía te-

niendo una altura de 70 metros, destruyendo todo a su paso.

El acontecimiento entero duró menos de siete minutos, pero se cobró unas 2.600 vidas. Aunque éste se conoce como el peor desastre de la historia ocurrido en una presa, la propia presa de Vaiont se mantuvo intacta. Y aunque la catástrofe fue desencadenada por la interferencia humana en el río Vaiont, el deslizamiento habría ocurrido finalmente por sí mismo; sin embargo, los efectos no habrían sido tan trágicos.



▲ **Figura 15.A** Mapa esquemático del área del río Vaiont que muestra los límites del deslizamiento, la porción del embalse que se llenó de derrubios y la extensión de la inundación corriente abajo. (Tomado de G. A. Kiersch, «Vaiont Reservoir Disaster», *Civil Engineering* 34 (1964) 32-39.)

al agua a poca profundidad. Esta barrera casi impermeable impide o reduce la infiltración del agua, lo cual se traduce en un aumento de la escorrentía superficial durante las lluvias. La consecuencia puede ser la aparición de torrentes peligrosos de barro viscoso y derrubios rocosos.

Terremotos como desencadenantes

En una zona pueden existir durante mucho tiempo condiciones favorables para los procesos gravitacionales sin que se produzca movimiento alguno. A veces es necesario

un factor adicional para desencadenar el movimiento. Entre los desencadenantes más importantes y espectaculares se encuentran los terremotos. Un terremoto y sus réplicas pueden desalojar volúmenes enormes de roca y de material no consolidado. El acontecimiento ocurrido en los Andes peruanos, descrito al principio de este capítulo, es un ejemplo trágico.

Deslizamientos desencadenados por el terremoto Northridge En enero de 1994 un terremoto azotó la región de Los Angeles, al sur de California. Bautizado por su epicentro

en la localidad de Northridge, el acontecimiento de una magnitud de 6,7 produjo pérdidas estimadas en 20.000 millones de dólares. Algunas de estas pérdidas fueron el resultado de miles de deslizamientos en una zona de 10.000 metros cuadrados que se pusieron en movimiento a causa del sismo. En la mayoría de casos se trató de caídas y deslizamientos de rocas superficiales, pero algunos fueron mucho mayores y llenaron los fondos del cañón de un revoltijo de suelo, rocas y derrubios vegetales. Los derrubios de los fondos del cañón crearon una amenaza secundaria porque podían movilizarse durante las tormentas y crear corrientes de derrubios. Las corrientes de este tipo son comunes y suelen resultar desastrosas al sur de California.

Los procesos gravitacionales desencadenados por el terremoto Northridge destruyeron docenas de hogares y causaron grandes daños en carreteras, gaseoductos y la maquinaria de los pozos en los campos de petróleo. En algunos lugares, más del 75 por ciento de las zonas con pendiente fue denudado por los deslizamientos y se hicieron vulnerables a los procesos gravitacionales posteriores desencadenados por las fuertes lluvias.

Licuefacción El intenso temblor de tierra durante los terremotos puede provocar que los materiales superficiales saturados en agua pierdan su resistencia y se conviertan en masas que fluyen parecidas a los fluidos. Este proceso, denominado *licuefacción*, fue una de las causas principales de los daños a la propiedad en Anchorage, Alaska, durante el impresionante terremoto de Viernes Santo en 1964 descrito en el Capítulo 11.

¿Deslizamientos sin desencadenantes?

¿Los procesos gravitacionales rápidos requieren siempre algún tipo de desencadenante como las fuertes lluvias o un terremoto? La respuesta es no; esos acontecimientos a veces ocurren sin ningún desencadenante. Por ejemplo, la tarde del 9 de mayo de 1999, un deslizamiento provocó la muerte de 10 excursionistas e hirió a otros muchos en el Parque Estatal Sacred Falls cerca de Hauula en la costa septentrional de Oahu, Hawaii. El trágico acontecimiento tuvo lugar cuando una masa de roca de la pared de un cañón descendió 150 metros por una pendiente casi vertical al fondo del valle. Debido a cuestiones de seguridad, el parque se cerró para que los especialistas en deslizamientos del U. S. Geological Survey pudieran investigar el lugar. En su estudio, concluyeron que el deslizamiento se produjo *sin un desencadenante* procedente de ninguna condición externa apreciable.

Muchos procesos gravitacionales rápidos ocurren sin un desencadenante apreciable. Los materiales de la pendiente se debilitan de manera gradual con el tiempo bajo

la influencia de la meteorización a largo plazo, la infiltración de agua y otros procesos físicos. Al final, si la resistencia cae por debajo del nivel necesario para mantener la estabilidad de la pendiente, se producirá un deslizamiento. El ritmo de los acontecimientos de este tipo es aleatorio y, por tanto, es imposible predecirlos con precisión.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Cuántas muertes se cobran los deslizamientos cada año?

El U. S. Geological Survey calcula que entre 25 y 50 personas mueren a causa de los deslizamientos cada año en Estados Unidos. El peaje de muertes en todo el mundo, por supuesto, es mucho más elevado.

Clasificación de los procesos gravitacionales

Hay una larga serie de procesos diferentes que los geólogos denominan procesos gravitacionales o movimientos de masa. En la Figura 15.3 se ilustran cuatro de ellos. En general, los diferentes tipos se clasifican en función del tipo de material implicado, de la clase de movimiento exhibido y de la velocidad del mismo.

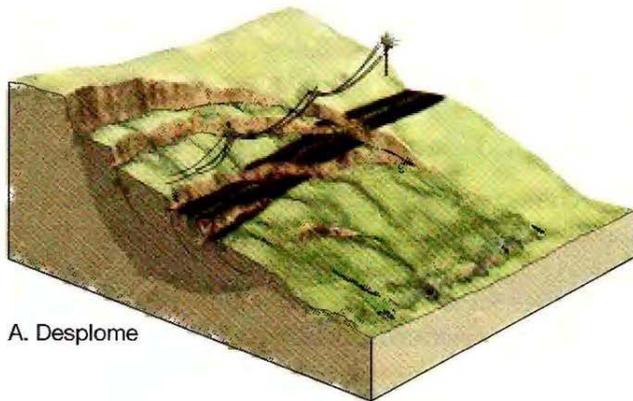
Tipo de material

La clasificación de los procesos gravitacionales en función del material implicado en el movimiento depende de si la masa descendiente empezó como un material no consolidado o como sustrato de roca. Si el suelo y el regolito son dominantes, se utilizan términos como derrubios, barro o tierra en la descripción. Por el contrario, cuando se desprende y se desplaza pendiente abajo una masa rocosa, el término roca será parte de la descripción.

Tipo de movimiento

Además de caracterizar el tipo de material implicado en un acontecimiento del movimiento de masa, también puede ser importante cómo se mueve el material. En general, la clase de movimiento se describe como desprendimiento, deslizamiento o flujo.

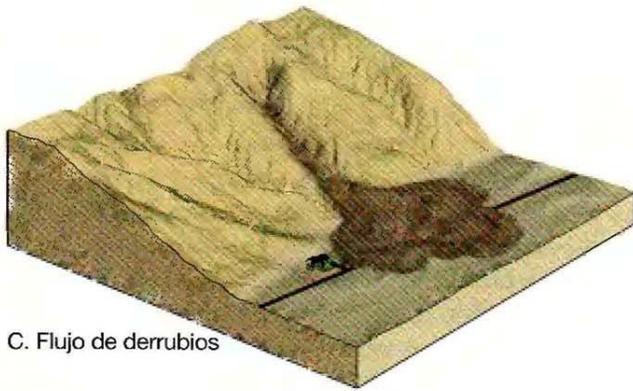
Desprendimiento Cuando el movimiento implica la caída libre de fragmentos sueltos de cualquier tamaño, se denomina **desprendimiento**. El desprendimiento es una forma común de movimiento en pendientes que son tan empinadas que el material suelto no puede mantenerse



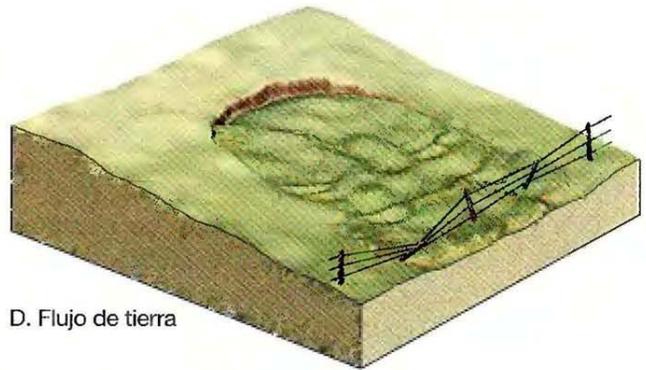
A. Desplome



B. Deslizamiento de rocas



C. Flujo de derrubios



D. Flujo de tierra

▲ **Figura 15.3** Los cuatro procesos ilustrados aquí se consideran todas formas relativamente rápidas de procesos gravitacionales. Dado que el material en los desplomes **A** y en los deslizamientos de roca **B** se mueven a lo largo de superficies bien definidas, se dice que se mueven por deslizamiento. Por el contrario, cuando el material se mueve pendiente abajo como un fluido viscoso, el movimiento se describe como un flujo. Los flujos de derrubios **C** y los flujos de tierra **D** avanzan pendiente abajo de esta manera.

sobre la superficie. La roca puede desprenderse directamente hacia la base de la pendiente o moverse en una serie de saltos y rebotes sobre otras rocas a lo largo del camino. Muchos desprendimientos se producen cuando los ciclos de congelación y deshielo o la acción de las raíces de las plantas, o ambas cosas, debilitan tanto las rocas que interviene la gravedad. Aunque hay señales a lo largo de afloramientos rocosos que en las carreteras advierten de desprendimientos de roca, pocos de nosotros hemos sido realmente testigos de esos acontecimientos. Sin embargo, ocurren de verdad. Así, el desprendimiento ocurrido la mañana del 9 de mayo de 2003, en el cañón Glenwood de Colorado interrumpió temporalmente el tráfico en dirección este y en dirección oeste de la Interestatal 70. Grandes rocas de hasta 4 metros cúbicos cayeron sobre la carretera. Una masa de roca del tamaño de un coche cruzó rebotando toda la autopista y acabó reposando en el canal del río Colorado. Por fortuna, no hubo heridos graves.

Los desprendimientos son la forma fundamental por la que se crean y mantienen las *pendientes de talud*. A veces los desprendimientos pueden desencadenar otras formas

de movimientos pendiente abajo. Por ejemplo, recordemos que el desastre de Yungay descrito al principio del capítulo se inició por el desprendimiento de una masa de material en caída libre desde la cima casi vertical del Nevado Huascarán.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Qué dificultad tiene subir por la pendiente de un talud?

Mucha. Puede describirse con más precisión como una escalada debido a su inclinación. Ascender por la pendiente de un talud de material más grueso implica escalar de bloque en bloque. La pendiente de un talud compuesto de material más fino es más difícil de escalar porque se puede provocar el deslizamiento del material a medida que se asciende. A menudo, esta actividad agotadora se traduce en resbalar alrededor de un paso y medio hacia atrás por cada paso que se da.

Deslizamiento La mayoría de los procesos gravitacionales se describe como **deslizamiento**. Los deslizamientos se producen cuando el material se mantiene bastante coherente y se mueve a lo largo de una superficie bien definida. A veces la superficie es una diaclasa, una falla o un plano de estratificación que es aproximadamente paralelo a la pendiente. Sin embargo, en el caso del movimiento denominado desplome, el material descendente se mueve en masa a lo largo de una superficie de ruptura curva.

Llegados a este punto es necesaria una nota de aclaración. A veces la palabra deslizamiento se utiliza como sinónimo de *corrimiento de tierras*. Debe indicarse que, aunque muchas personas, los geólogos incluso, la utilizan, esta última expresión carece de una definición específica en Geología. Más bien, debe considerarse un término popular no técnico que describe todas las formas perceptibles de procesos gravitacionales, entre ellas las formas en las que no se producen deslizamientos.

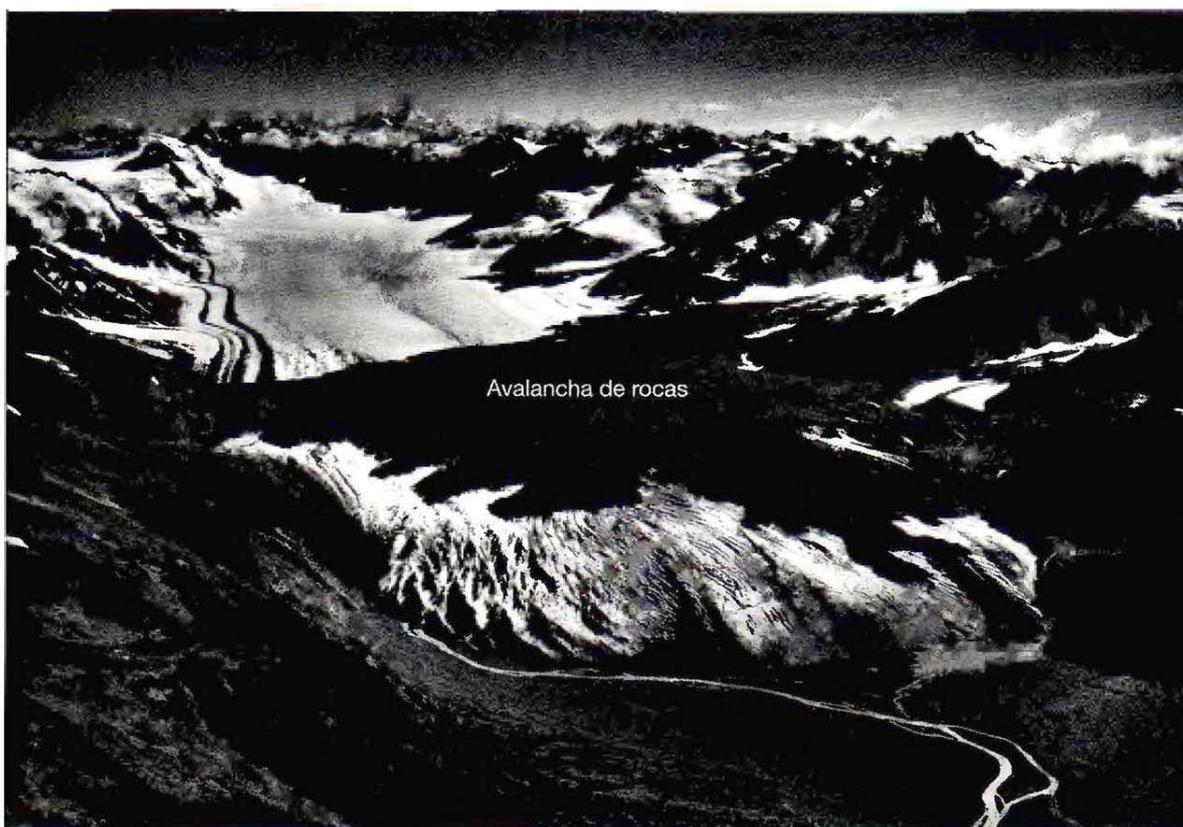
Flujo El tercer tipo de movimiento común para los procesos gravitacionales se denomina **flujo**. El flujo se produce cuando el material se desplaza pendiente abajo en forma de un fluido viscoso. La mayor parte de los flujos

está saturada de agua y se mueve normalmente siguiendo una forma de lengua o lóbulo.

Velocidad de movimiento

El acontecimiento descrito al principio de este capítulo implicaba claramente un movimiento rápido. La roca y los derrubios se movían pendiente abajo a velocidades que superaban en mucho los 200 kilómetros por hora. Este tipo de movimiento de masa más rápido se denomina **avalancha de rocas** (*avalancher* = descender). Muchos investigadores creen que las avalanchas de roca, como la que se produjo en el paisaje de la Figura 15.4, deben «flotar literalmente en el aire», conforme desciende pendiente abajo. Es decir, se producen velocidades elevadas cuando el aire queda atrapado y comprimido debajo de la masa de derrubios que se precipita, permitiendo que se mueva como una lámina flexible y elástica a través de la superficie.

La mayoría de los movimientos de masa, sin embargo, no se desplaza con la velocidad de una avalancha de rocas. De hecho, la gran mayoría de los procesos gravitacionales son imperceptiblemente lentos. Un proceso que examinaremos más tarde, denominado *reptación*, es



▲ **Figura 15.4** Esta larga lengua de 4 kilómetros de cascotes fue depositada en la cima del glaciar Sherman de Alaska por una avalancha de rocas. El acontecimiento fue desencadenado por un tremendo terremoto ocurrido en marzo de 1964. (Foto de Austin Post, U. S. Geological Survey.)

consecuencia de movimientos de partículas que suelen medirse en milímetros o centímetros al año. Por tanto, como puede verse, las velocidades del movimiento pueden ser espectacularmente súbitas o excepcionalmente graduales. Aunque los diversos tipos de procesos gravita-

cionales suelen clasificarse en rápidos o lentos, esta distinción es muy subjetiva, ya que existe un amplio intervalo de velocidades entre los dos extremos. Incluso la velocidad de un proceso individual en un lugar concreto puede variar considerablemente (véase Recuadro 15.2).



Recuadro 15.2 ► El hombre y el medio ambiente

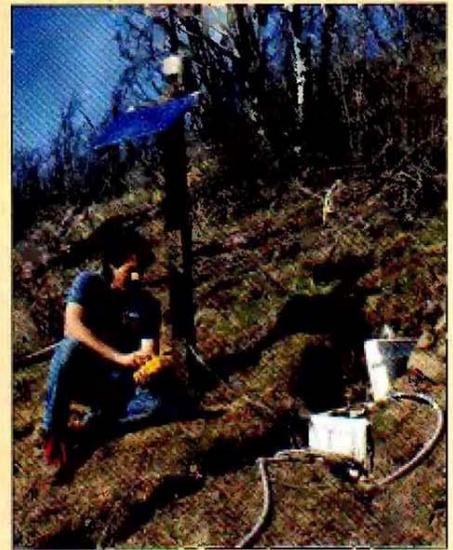
Control a tiempo real de los deslizamientos activos*

Los deslizamientos son una amenaza para la vida y la propiedad en los 50 estados que componen Estados Unidos. Para reducir el riesgo procedente de los deslizamientos activos, el U. S. Geological Survey (USGS) desarrolla y utiliza sistemas de control en tiempo real de los deslizamientos. El control puede detectar las indicaciones iniciales del movimiento catastrófico rápido.

Durante las fuertes lluvias de enero de 1997, miles de toneladas de rocas y derrubios cedieron en Sierra Nevada, destruyeron tres casas, bloquearon una carretera principal del norte de California (U. S. 50) y formaron un dique en el río Americano adyacente durante un breve intervalo de tiempo (Figura 15.B). Las aguas estancadas por el deslizamiento inundaron la carretera y se llevaron dos coches que circulaban por ella, lo cual llevó a unos res-

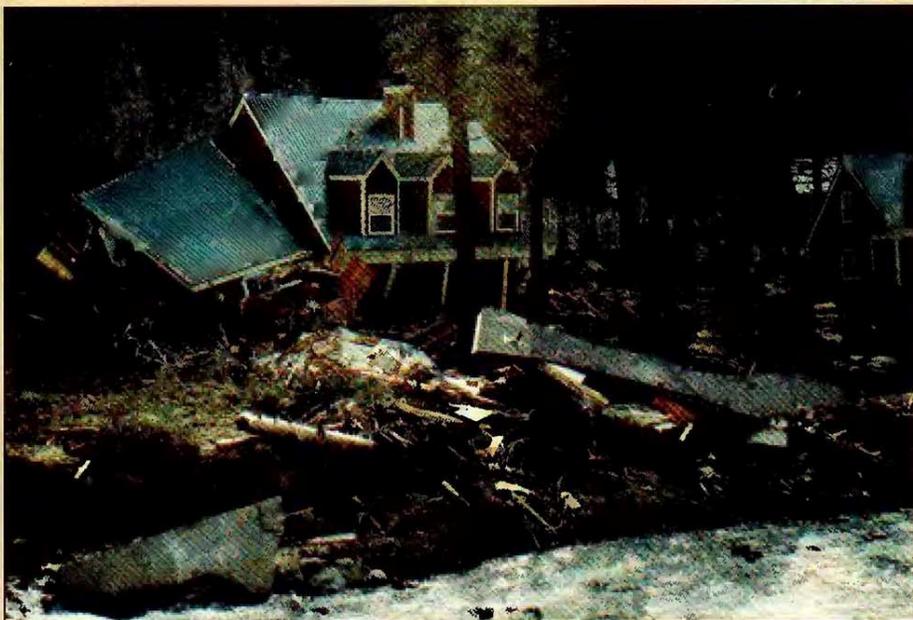
cates espectaculares. La reapertura de la carretera costó 4,5 millones de dólares y se calcula que las pérdidas económicas indirectas del cierre de la carretera superaron los 50 millones de dólares.

Varios deslizamientos grandes y activos de la misma zona continúan amenazando la carretera U. S. 50. Aunque estos deslizamientos suelen moverse lentamente, algunos tienen el potencial de colapsar de manera catastrófica. Para ayudar a reducir el riesgo que estos movimientos rápidos representan, el USGS, en colaboración con otras agencias, estableció un control continuo en tiempo real de la actividad de los deslizamientos mediante sistemas desarrollados para controlar los volcanes activos de zonas remotas. Los datos procedentes de varios sensores instalados en los deslizamientos son transmitidos por radio a los computadores del USGS (Figura 15.C).



▲ **Figura 15.C** Prueba de un sistema de radioteleetría alimentado con energía solar para la transmisión a distancia de datos de un deslizamiento en tiempo real. En las zonas de deslizamiento controladas a distancia, el movimiento del suelo y las presiones de las aguas subterráneas se miden cada segundo. La cantidad del movimiento descendente es registrada por extensómetros que pueden detectar la tensión o el acortamiento del suelo. Las vibraciones del suelo se controlan mediante geófonos enterrados en el interior de los deslizamientos. Las condiciones de las aguas subterráneas en el interior de los deslizamientos se controlan a través de sensores de la presión del agua de los poros y los pluviómetros *in situ* registran las precipitaciones. (Foto de Mark Reid/U. S. Geological Survey.)

¿Por qué es necesario recoger a distancia los datos del deslizamiento en tiempo real? La detección inmediata de la actividad del deslizamiento proporcionada por los sistemas en tiempo real puede



▲ **Figura 15.B** Casa destruida por un deslizamiento catastrófico súbito en 1997 a lo largo de la carretera U. S. 50, a unos 40 kilómetros al este de Placerville, California. (Foto de Mark Reid/U. S. Geological Survey.)

* Basado en el material preparado por el U. S. Geological Survey.

ser crucial para salvar las vidas humanas y proteger la propiedad. El control puede determinar la velocidad del movimiento del deslizamiento y también puede detectar los primeros indicios del movimiento catastrófico. El movimiento rápido de algunos deslizamientos, por ejemplo, va precedido de una aceleración gradual. Utilizando los datos en tiempo real procedentes de esos deslizamientos, los geólogos pueden predecir los posibles movi-

mientos catastróficos. El control de deslizamientos del USGS se centra en la detección de (1) las condiciones de precipitación y de aguas subterráneas que podrían desestabilizar la pendiente de la elevación, (2) la aceleración del movimiento del deslizamiento y (3) las vibraciones del suelo asociadas con el movimiento.

En la actualidad, 58 instrumentos controlan en tiempo real cinco desliza-

mientos a lo largo de la carretera U. S. 50. Esta red, dirigida en colaboración con el Departamento de Transportes de California, proporciona la notificación temprana de la actividad del deslizamiento y la información útil para el diseño de medidas correctivas para frenar estos deslizamientos. El USGS dirige otros puntos de control remoto en tiempo real en California y Washington, Nuevo México y Colorado.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Las avalanchas de nieve se consideran un tipo de proceso gravitacional?

Sí. Algunas veces estos movimientos atronadores de la nieve y el hielo pendiente abajo mueven grandes cantidades de rocas, suelo y árboles. Por supuesto, las avalanchas de nieve son muy peligrosas, en especial para los esquiadores en las pendientes montañosas elevadas y para los edificios y las carreteras al pie de las pendientes en las regiones propensas a las avalanchas.

Cada año se producen alrededor de 10.000 avalanchas de nieve en la zona montañosa del oeste de Estados Unidos. En un año normal, se cobran entre 15 y 25 vidas en Estados Unidos y Canadá. Son un problema que va en aumento, puesto que cada vez hay más personas que practican los deportes y el ocio de invierno.

te en bloques múltiples. A veces, se acumula agua entre la base del escarpe y la parte superior del bloque inclinado. Conforme el agua se filtra hacia abajo a lo largo de la superficie de ruptura, puede promover una ulterior inestabilidad y un movimiento adicional.

Los desplomes se producen normalmente debido a que la ladera tiene una pendiente excesiva. El material situado en la porción superior de la pendiente se mantiene en su lugar por el material situado en la base de la misma. Conforme se elimina este material de anclaje de la base, el material situado encima se vuelve inestable y reacciona al empuje de la gravedad. Un ejemplo relativamente común es una pared de valle cuya pendiente se hace excesivamente empinada como consecuencia de un río meandriforme. El desplome puede producirse también cuando una pendiente está sobrecargada, causando tensión interna sobre el material que está debajo. Este tipo de desplome se produce a menudo en los lugares donde el material blando, rico en arcilla, se encuentra debajo de estratos de roca más compacta y resistente, como la arenisca. La infiltración del agua a través de las capas superiores reduce la cohesión de la arcilla que hay debajo y produce así el desplome de la pendiente.

Desplomes



Procesos gravitacionales ▼ Tipos de procesos gravitacionales

Se entiende por **desplome** el deslizamiento hacia abajo de una masa de rocas o de material no consolidado que se mueve como una unidad a lo largo de una superficie curva (Figura 15.5). Normalmente, el material desplomado no viaja a una velocidad espectacular ni muy lejos. Esta es una forma común de proceso gravitacional, en especial en acumulaciones gruesas de materiales cohesivos, como la arcilla. La superficie fracturada tiene una forma característica en cuchara, cóncava hacia arriba o hacia fuera. Conforme se produce el movimiento, se crea un escarpe en forma de cuarto creciente en la cabecera, y la superficie superior del bloque a veces se inclina hacia atrás. El desplome puede implicar una sola masa, pero a menudo consis-

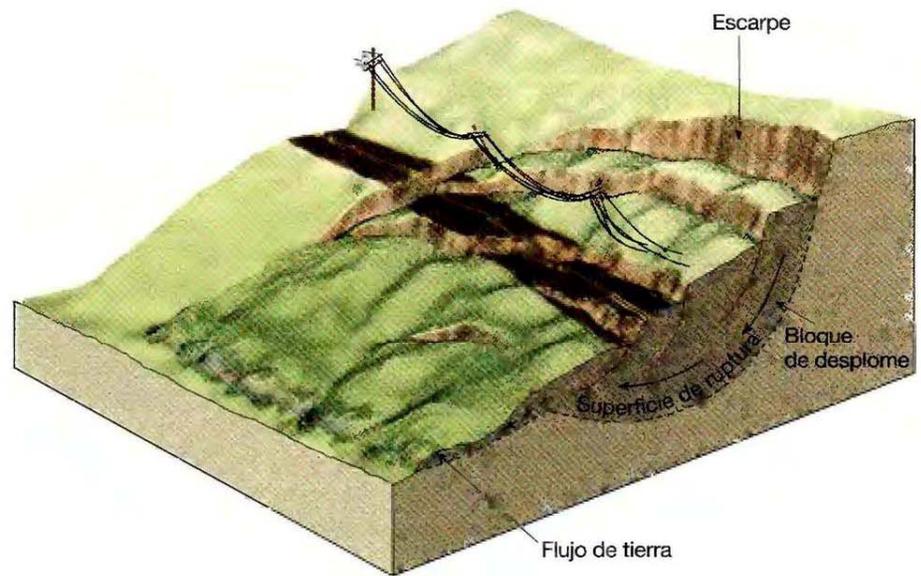
Deslizamiento de rocas



Procesos gravitacionales ▼ Tipos de procesos gravitacionales

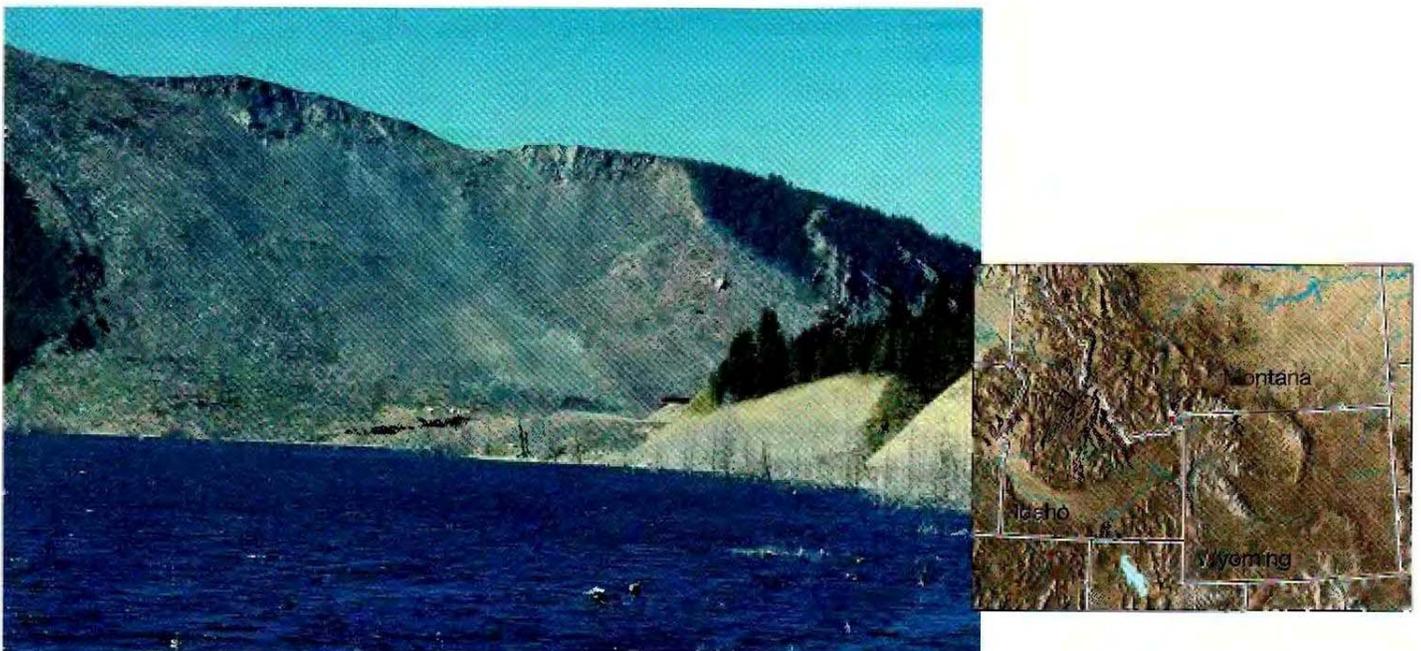
Los **deslizamientos de rocas** se producen cuando bloques rocosos se sueltan y se deslizan pendiente abajo (véase Figura 15.3B). Si el material implicado está muy poco consolidado, se utiliza la expresión **deslizamiento de derrubios**. Tales acontecimientos se cuentan entre los movimientos de masa más rápidos y más destructivos. Normalmente los deslizamientos de roca tienen lugar en un ambiente geológico donde los estratos rocosos están inclinados, o donde hay diaclasas y fracturas paralelas a la

► **Figura 15.5** Los desplomes se producen cuando el material se desliza pendiente abajo en masas a lo largo de una superficie de ruptura curva. Los flujos de tierra se forman a menudo en la base del desplome.



pendiente. Cuando dicha unidad de roca se ve socavada en la base de la pendiente, pierde apoyo y la roca acaba por desprenderse. A veces, los deslizamientos de roca se desencadenan cuando la lluvia o el agua de fusión de la nieve lubrican la superficie subyacente en el lugar en el cual la fricción ya no basta para mantener la unidad rocosa en su lugar. Como consecuencia, los deslizamientos de roca tienden a ser más comunes durante la primavera, cuando son más frecuentes las lluvias abundantes y la fusión de la nieve.

Los terremotos pueden desencadenar deslizamientos rocosos y otros movimientos de masa. El terremoto ocurrido en 1811 en Nuevo Madrid, Missouri, por ejemplo, produjo deslizamientos en un área de más de 13.000 kilómetros cuadrados a lo largo del valle del río Mississippi. Un ejemplo más reciente se produjo el 17 de agosto de 1959, cuando un intenso terremoto iniciado al este del Parque Nacional Yellowstone desencadenó un deslizamiento masivo en el cañón del río Madison en el suroeste de Montana (Figura 15.6). En cuestión de momentos,



▲ **Figura 15.6** El 17 de agosto de 1959 un terremoto desencadenó un impresionante deslizamiento de rocas en el cañón del río Madison de Montana. Alrededor de 27 millones de metros cúbicos de derrubios descendieron por la pared del cañón y formaron un dique que creó el lago Earthquake. (Foto de John Montagne.)

se deslizó en el cañón una cantidad calculada en 27 millones de metros cúbicos de roca, suelo y árboles. Los derrubios obstruyeron el río y enterraron una carretera y una zona de acampada. Perecieron más de veinte campistas a quienes pilló desprevenidos.

No muy lejos de aquella zona, se había producido 34 años antes el deslizamiento de rocas del Gros Ventre. El río Gros Ventre fluye hacia el oeste desde la parte más septentrional de la cordillera Wind River en el noroeste de Wyoming, a través del Parque Nacional Grand Teton, y acaba vaciándose en el río Snake. El 23 de junio de 1925, ocurrió en su valle un imponente deslizamiento de rocas, justo al este de la pequeña ciudad de Kelly. En el lapso de tan sólo unos minutos, una gran masa de arenisca, lutita y suelo chocó contra el lado sur del valle, llevándose con él un denso pinar. El volumen de derrubios, que se calculó en 38 millones de metros cúbicos, creó un dique de 70 metros de alto en el río Gros Ventre. Debido a que este río se bloqueó por completo, se formó un lago. Éste se llenó tan deprisa que una casa que había estado 18 metros por encima del río flotaba fuera de sus cimientos 18 horas después del deslizamiento. En 1927, el lago desbordó el dique, drenando en parte el lago y produciendo una devastadora inundación corriente abajo.

¿Por qué ocurrió el deslizamiento de rocas del Gros Ventre? Durante la primavera de 1925, el agua procedente de las intensas lluvias y de la fusión de las nieves se precipitó a través de la arenisca, saturando la arcilla de debajo. Dado que gran parte de la capa de arenisca había sido atravesada por el río Gros Ventre, la capa carecía prácticamente de apoyo en el fondo de la pendiente. Por fin la arenisca ya no pudo mantener su posición sobre la arcilla humedecida, y la gravedad empujó la masa hacia abajo por la ladera del valle. Las circunstancias en esta localización fueron tales que el acontecimiento fue inevitable.

Flujo de derrubios



Procesos gravitacionales ▼ Tipos de procesos gravitacionales

El **flujo de derrubios** es un tipo relativamente rápido de proceso gravitacional que consiste en la fluencia de suelo y regolitos con abundante cantidad de agua (Figura 15.3C). Los flujos de derrubios, denominados también **coladas de barro**, son fundamentalmente característicos de las regiones montañosas semiáridas y son también comunes en las pendientes de algunos volcanes. Debido a sus propiedades fluidas, los flujos de derrubios suelen seguir los cañones y los cauces fluviales. En las áreas pobladas, los flujos de de-

rrubios pueden plantear un riesgo significativo para la vida y las propiedades.

Flujos de derrubios en las regiones semiáridas

Cuando un aguacero o la fusión rápida de la nieve de una montaña crean una inundación súbita en una región semiárida, grandes cantidades de suelo y de regolito inundan los cauces de escorrentía próximos debido a que normalmente hay poca vegetación que fije el material de superficie. El producto final es una lengua de lodo, suelo, roca y agua bien mezclados en movimiento. Su consistencia puede oscilar entre la del cemento húmedo y la de una mezcla no más espesa que el agua fangosa. La velocidad de flujo, por consiguiente, depende no sólo de la pendiente, sino también del contenido en agua. Cuando son densos, los flujos de derrubios son capaces de transportar o empujar grandes cantos rodados, árboles e incluso casas con relativa facilidad.

Los flujos de derrubios plantean un peligro serio al desarrollo en áreas de montaña relativamente secas como las del sur de California. La construcción de viviendas en las laderas de los cañones y la eliminación de la vegetación autóctona quemando los matorrales o de otras maneras han aumentado la frecuencia de esos acontecimientos destructivos. Además, cuando un flujo de derrubios alcanza el final de un cañón estrecho y empinado, se propaga hacia fuera, cubriendo el área que hay más allá de la boca del cañón con una mezcla de derrubios húmedos. Este material contribuye a la acumulación de depósitos en forma de abanico en las bocas de los cañones. Los abanicos se acumulan de una manera relativamente fácil; tienen a menudo bellas vistas y están cerca de las montañas, convirtiéndose en zonas preferidas para el desarrollo urbanístico. Debido a que los flujos de derrubios se producen sólo de manera esporádica, la gente no suele ser consciente del riesgo potencial de estas zonas (véase Recuadro 15.3).

Lahares

Los flujos de derrubios compuestos principalmente de materiales volcánicos en los flancos de los volcanes se denominan **lahares**. La palabra se originó en Indonesia, una región volcánica que ha experimentado muchos de esos acontecimientos a menudo destructivos. Históricamente, los lahares han sido uno de los riesgos volcánicos más mortales. Pueden tener lugar tanto durante una erupción como durante el período de reposo del volcán. Se producen cuando capas muy inestables de cenizas y derrubios se saturan de agua y fluyen pendiente abajo por las laderas volcánicas. Estos flujos siguen generalmente los cauces de corrientes existentes. A menudo, se desencadenan por las lluvias den-



Recuadro 15.3 ▶ El hombre y el medio ambiente

Flujos de derrubios en los abanicos aluviales: estudio de un caso de Venezuela*

En diciembre de 1999, las fuertes lluvias desencadenaron miles de deslizamientos a lo largo de la costa de Venezuela (Figura 15.D). Los flujos de derrubios y las riadas provocaron grandes daños a las propiedades y la trágica pérdida aproximada de 19.000 vidas. Los puntos donde se registraron los mayores niveles de muerte y destrucción fueron los *abanicos aluviales*. Estos accidentes del relieve son acumulaciones ligeramente inclinadas, con una forma de cono a abanico, de sedimentos que suelen encontrarse donde las corrientes de gradiente elevado dejan los valles estrechos de las zonas montañosas y se encuentran súbitamente en un terreno plano**.

Varios cientos de miles de personas viven en la estrecha zona litoral al norte de Caracas, Venezuela. Ocupan los abanicos aluviales situados en la base de las montañas escarpadas que se elevan a más de 2.000 metros porque éstas son las únicas zonas que no son demasiado escarpadas para construir (Figura 15.E). Estos asentamientos son altamente vulnerables a los deslizamientos provocados por las lluvias.

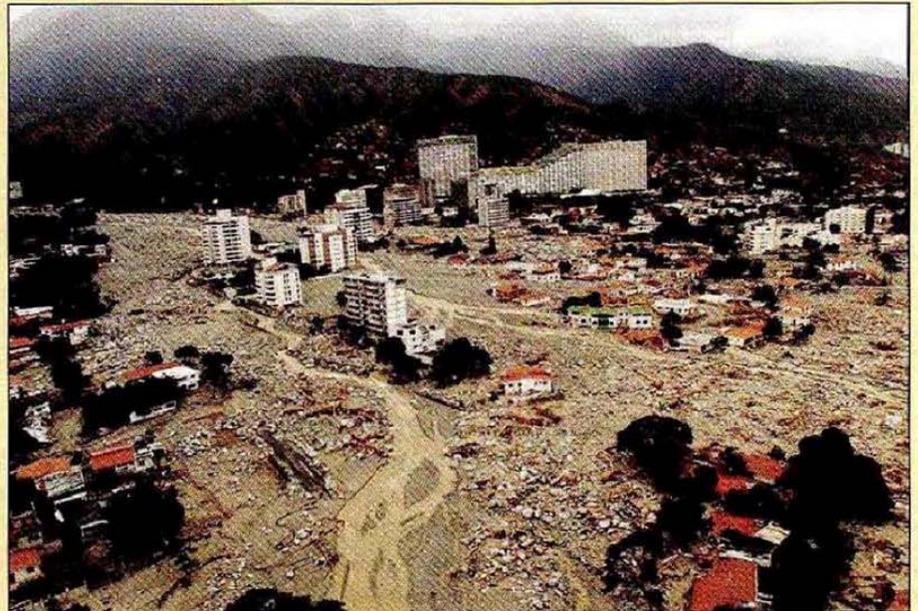
Durante un período inusualmente húmedo de diciembre de 1999 se registraron



▲ **Figura 15.D** Área de Venezuela afectada por los desastrosos flujos de derrubios y las riadas en 1999.

* Basado en el material preparado por el U. S. Geological Survey.

** Para conocer más sobre los abanicos aluviales véase pág. 459 en el Capítulo 16 y pág. 545 en el Capítulo 19.



▲ **Figura 15.E** Vista aérea del abanico aluvial muy desarrollado de Caraballeda, Venezuela. (Associated Press Photo.)

lluvias de 20 centímetros los días 2 y 3 de diciembre, seguidas por otros 91 centímetros entre el 14 y el 16 de diciembre. Las fuertes lluvias desencadenaron miles de flujos de derrubios y otros tipos de procesos gravitacionales. Una vez creados, esos movimientos de masas de barro y rocas coalescieron y formaron flujos gigantes de derrubios que se movían a gran velocidad a través de los cañones abruptos y estrechos antes de precipitarse sobre los abanicos aluviales.

En prácticamente todos los abanicos aluviales de la zona, los flujos de derrubios y las riadas transportaron cantidades masivas de sedimentos, entre ellos bloques de hasta 10 metros de diámetro, que dañaron o destruyeron centenares de casas y otras estructuras. Los daños totales se aproximaron a los 2.000 millones de dólares.

Este ejemplo de Venezuela muestra el potencial de pérdida de vidas y daño a la

propiedad extremos en los lugares donde grandes cantidades de personas ocupan los abanicos fluviales. La posibilidad de que se produzcan acontecimientos similares de magnitud comparable existe en otras partes del mundo.

Construir comunidades en los abanicos aluviales puede transformar los procesos naturales en grandes acontecimientos mortales. Según Kofi Annan, Secretario General de las Naciones Unidas: «El término “desastre natural” se ha convertido en un nombre inapropiado y cada vez más anacrónico. En realidad, el comportamiento humano transforma los peligros naturales en lo que realmente deberían llamarse desastres no naturales»***.

*** Matthew C. Larsen, et al. *Natural Hazards on Alluvial Fans: The Venezuela Debris Flow and Flash Flood Disaster*, U. S. Geological Survey Fact Sheet FS 103, pág. 4.

sas. Otros se inician cuando grandes volúmenes de hielo y nieve se funden por el calor que asciende a la superficie desde el interior del volcán o por los gases calientes y los restos casi fundidos emitidos durante una erupción violenta.

Cuando entró en erupción el monte Santa Elena en mayo de 1980, se crearon varios lahares. Los flujos y las inundaciones acompañantes corrieron ladera abajo por los valles de las bifurcaciones norte y sur del río Toutle a

velocidades que a menudo superaron los 30 kilómetros por hora. Por fortuna, el área afectada no estaba densamente poblada. No obstante, se destruyeron o resultaron muy dañados más de 200 hogares (Figura 15.7). La mayor parte de los puentes siguió un destino similar. Según el U. S. Geological Survey:

Aun después de viajar muchas decenas de kilómetros desde el volcán y mezclarse con agua fría, las coladas de barro mantenían temperaturas que oscilaban entre los 84 °C y los 91 °C; indudablemente sus temperaturas eran más elevadas cuanto más cerca estaban del origen de la erupción... Localmente, las coladas de barro se elevaron por encima de las paredes de los valles hasta 108 metros y por encima de las colinas hasta 75 metros. Según las huellas dejadas por las líneas de barro, la mayor profundidad de las coladas de barro osciló entre 9,9 y 19,8 metros*.

Finalmente los lahares del área de drenaje del río Toutle transportaron más de 50 millones de metros cúbicos de material a los ríos Cowlitz y Columbia. Los depósitos redujeron temporalmente la capacidad transportadora del agua del río Cowlitz en un 85 por ciento, y se redujo la profundidad del cauce de navegación del río Columbia desde 12 metros a menos de 4 metros.

► **Figura 15.7** Casa dañada por un lahar a lo largo del río Toutle, al oeste-noroeste del monte Santa Elena. La sección final de la casa fue desgajada e incrustada contra los árboles. (Foto de D. R. Crandell, U. S. Geological Survey.)



En noviembre de 1985, se produjeron lahares durante la erupción del Nevado del Ruiz, un volcán de 5.300 metros de los Andes colombianos. La erupción fundió gran parte de la nieve y el hielo que cubrían los 600 metros superiores del pico, produciendo torrentes de derrubios, cenizas y lodos viscosos calientes. Los lahares se desplazaron hacia fuera del volcán, siguiendo los valles de tres ríos crecidos por la lluvia que irradian desde la cima. El flujo que descendió hacia el valle del río Lagunilla fue el más destructivo. Devastó la ciudad de Armero, a 48 kilómetros de la montaña. La mayoría de las más de 25.000 muertes causadas por el acontecimiento se produjeron en esta comunidad agrícola que en una ocasión fue próspera.

Esos lahares también produjeron muertes y destrucción de propiedades en otros 13 pueblos situados dentro de la zona catastrófica que abarcó 180 kilómetros cuadrados. Aunque el Nevado del Ruiz arrojó explosivamente una gran cantidad de material piroclástico, lo que causó este desastre natural tan devastador fueron los lahares desencadenados por esta erupción. De hecho, fue el peor desastre volcánico acaecido desde la erupción del monte Pelée, en la isla caribeña de la Martinica, en 1902, durante la cual murieron 28.000 personas**.

* Robert I. Tilling, *Eruptions of Mount St. Helens: Past, Present and Future*. Washington, DC: U. S. Government Printing Office, 1987.

** Puede encontrarse un comentario sobre la erupción del monte Pelée en la sección sobre volcanes compuestos del Capítulo 5.

Flujos de tierra



Procesos gravitacionales ▼ Tipos de procesos gravitacionales

Hemos visto que los flujos de derrubios suelen estar confinados a los cauces de las regiones semiáridas. Por el contrario, los **flujos de tierra** se forman más a menudo en las laderas de las colinas de las áreas húmedas durante épocas de precipitación abundante o de deshielo (véase Figura 15.3D). Cuando el agua satura el suelo y el regolito de la ladera de una colina, el material puede desgajarse, dejando una cicatriz en la pendiente, y formar una masa en forma de lengua o de lágrima que fluye pendiente abajo (Figura 15.8).

Los materiales más comúnmente implicados son ricos en arcilla y limo y contienen sólo pequeñas proporciones de arena y granos más gruesos. El tamaño de los flujos de tierra oscila entre cuerpos de unos pocos metros de longitud, unos pocos metros de ancho y menos de un metro de profundidad y masas de más de un kilómetro de longitud, varios centenares de metros de anchura y más de diez metros de profundidad. Dado que los flujos de tierra son bastante viscosos, en general se mueven más lentamente que los flujos de derrubios, más fluidos, descritos en la sección precedente. Se caracterizan por un movimiento lento y persistente y pueden permanecer activos durante períodos que oscilan entre días y años. Dependiendo del grado de inclinación de la pendiente y de la consistencia del material, las velocidades medidas oscilan desde menos de un milímetro al día hasta varios metros al día. A lo largo del período durante el cual son activos los flujos de tierra, el movimiento suele ser más rápido durante los períodos húmedos que durante las épocas más secas. Además de ocurrir como fenó-

menos de ladera aislados, los flujos de tierra tienen lugar normalmente en asociación con grandes desplomes. En esta situación, pueden verse como flujos en forma de lengua en la base del bloque de desplome (Figura 15.5).

Movimientos lentos



Procesos gravitacionales ▼ Tipos de procesos gravitacionales

Los movimientos del tipo de los deslizamientos de rocas, las avalanchas de rocas y los lahares son desde luego las formas más espectaculares y catastróficas de los procesos gravitacionales. Al comprobarse que estos acontecimientos matan a miles de personas, merecen un estudio intensivo, de manera que, mediante una prevención más eficaz, advertencias oportunas y mejores controles, pueda ayudarse a salvar vidas. Sin embargo, debido a su gran tamaño y a su naturaleza espectacular, nos dan una impresión falsa de su importancia como proceso gravitacional. De hecho, los movimientos súbitos son responsables del movimiento de menos material que la acción más lenta y mucho más sutil de la reptación. Mientras que los tipos rápidos de procesos gravitacionales son característicos de las montañas y las laderas empinadas de las colinas, la reptación tiene lugar en pendientes tanto empinadas como suaves y es, por tanto, mucho más general.

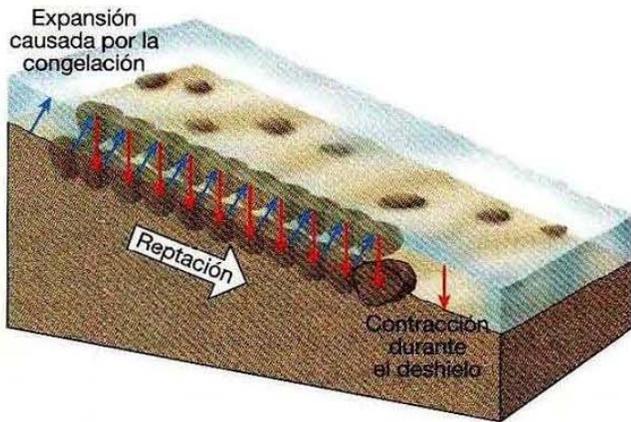
Reptación

La **reptación** es un tipo de proceso gravitacional que implica el movimiento descendente gradual del suelo y el regolito. Un factor que contribuye a la reptación es la



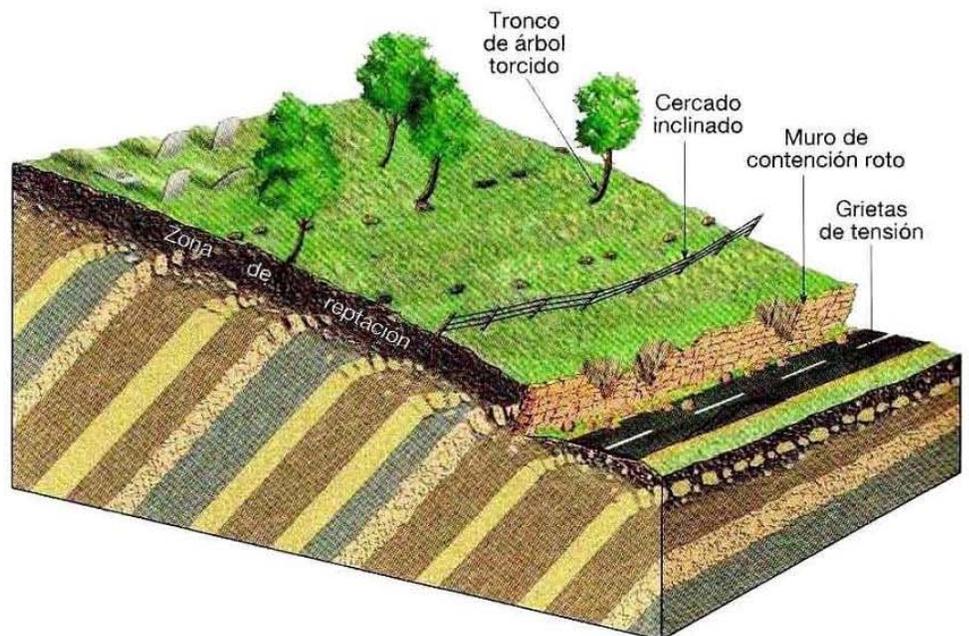
◀ **Figura 15.8** Este pequeño flujo de tierra en forma de lengua se produjo en una pendiente recién formada a lo largo de una carretera recién construida. Se formó en material rico en arcilla después de un período de densas lluvias. Obsérvese el pequeño desplome en la cabecera del flujo de tierra. (Foto de E. J. Tarbuck.)

expansión y contracción alternantes del material de superficie causadas por congelación y deshielo o por humectación y sequedad. Como se muestra en la Figura 15.9, la congelación o la humectación elevan las partículas según un ángulo recto con respecto a la pendiente, y el deshielo o la sequía permiten que las partículas vuelvan a caer a un nivel ligeramente inferior. Cada ciclo, por consiguiente, mueve el material una cierta distancia colina abajo. Cualquier cosa que altere el suelo, como el impacto de las gotas de lluvia y las perturbaciones provocadas por las raíces de las plantas y los animales de madriguera, ayuda a la reptación. También se fomenta la reptación si el suelo se satura de agua. Después de una densa lluvia o del deshielo, el suelo saturado de agua puede perder su co-



▲ **Figura 15.9** La expansión y la contracción repetidas del material de superficie producen una migración neta pendiente abajo de las partículas de roca: un proceso denominado *reptación*.

► **Figura 15.10** Aunque la reptación es un movimiento imperceptiblemente lento, sus efectos son a menudo visibles.



hesión interna, permitiendo que la gravedad empuje el material pendiente abajo. Dado que la reptación es imperceptiblemente lenta, el proceso no puede observarse en acción. Lo que puede observarse, sin embargo, son los efectos de la reptación: inclinación de los cercados y los tendidos eléctricos y desplazamiento de los muros de contención (Figura 15.10).

Solifluxión

Cuando el suelo está saturado de agua, la masa empapada fluye pendiente abajo a una velocidad de unos pocos milímetros o unos pocos centímetros diarios o anuales. Este proceso se denomina **solifluxión** (literalmente, «flujo del suelo»). Es un tipo de proceso gravitacional común en los lugares en los que el agua no puede fugarse de la capa superficial saturada a través de la infiltración a niveles más profundos. Una capa dura de arcilla densa en el suelo o una capa de lecho de rocas impermeable pueden contribuir a la solifluxión.

La solifluxión es también común en las regiones situadas por encima del **permafrost**. Se entiende por permafrost el suelo permanentemente helado que va asociado con los severos climas de la Tierra en los casquetes polares y la tundra (véase Recuadro 15.4). La solifluxión puede considerarse como una forma de reptación en la cual el material no consolidado y saturado de agua se mueve lentamente pendiente abajo. Se produce en una zona situada por encima del permafrost denominada *capa activa*, que se funde a una profundidad aproximada de un metro durante el breve verano de las latitudes altas y se vuelve a congelar en invierno. Durante el verano, el agua



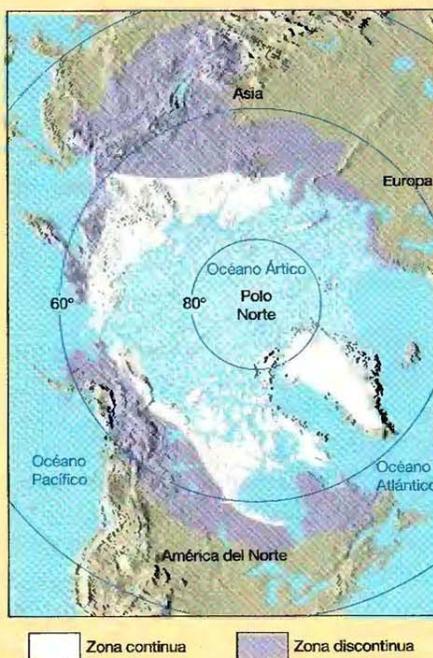
Recuadro 15.4 ▶ Entender la Tierra

El paisaje del delicado permafrost

Muchos de los desastres debidos a procesos gravitacionales descritos en este capítulo tuvieron impactos súbitos y desastrosos en las personas. Cuando las actividades humanas hacen que se funda el hielo contenido en el suelo permanentemente congelado, el impacto es más gradual y menos letal. No obstante, dado que las regiones con permafrost son paisajes frágiles y sensibles, las cicatrices resultantes de acciones poco planificadas pueden permanecer durante generaciones.

El suelo permanentemente congelado, conocido como *permafrost*, se produce donde los veranos son demasiado fríos como para que se funda algo más que una capa superficial del terreno. El terreno más profundo permanece congelado durante todo el año. En términos estrictos, el permafrost se define sólo en función de la temperatura; es decir, es un suelo con temperaturas que han permanecido bajo 0 °C continuamente durante 2 años o más. El grado en que se presenta el hielo en el terreno afecta de manera intensa al comportamiento del material superficial. Cuando se trata de construir carreteras, edificios y otros proyectos en áreas situadas por encima del permafrost, es muy importante conocer cuánto hielo hay y dónde está localizado.

Hay permafrost debajo de aproximadamente el 25 por ciento de las áreas continentales del planeta. Además de en la Antártida y en algunas áreas de alta montaña, el permafrost es extenso en las tierras que rodean el océano Ártico. Cubre más del 80 por ciento de Alaska, aproximadamente el 50 por ciento de Canadá y una porción sustancial del norte de Siberia (Figura 15.F). Cerca de los márgenes meridionales de la región, el permafrost consiste en masas aisladas relativamente finas. Más al norte, el área y el grosor aumentan gradualmente hasta zonas donde el permafrost es esencialmente continuo y su grosor puede aproximarse o incluso superar los 500 metros. En la zona discontinua, suele ser más difícil la planificación de uso del terreno que en las zonas continuas situadas más al norte, porque la

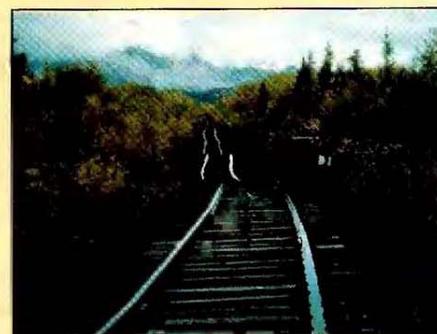


▲ **Figura 15.F** Distribución del permafrost en el hemisferio septentrional. Más del 80 por ciento de Alaska y alrededor del 50 por ciento de Canadá se encuentran situados encima del permafrost. Se reconocen dos zonas. En la zona continua, las únicas áreas libres de hielo se encuentran debajo de lagos o ríos profundos. En las porciones de latitudes más altas de la zona discontinua, sólo hay islas dispersas de terreno descongelado. En dirección al sur, el porcentaje de terreno descongelado aumenta hasta que todo el hielo desaparece. (Tomado del U. S. Geological Survey.)

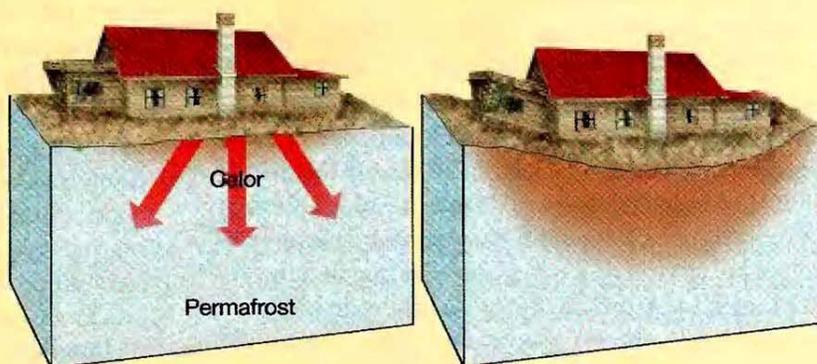
aparición de permafrost es parcheada y difícil de predecir.

Cuando el ser humano altera la superficie, ya sea eliminando la capa de vegetación aislante o construyendo carreteras y edificios, se altera el delicado equilibrio térmico, y el permafrost puede descongelarse (Figura 15.G). La descongelación produce un terreno inestable que puede deslizarse, desplomarse, experimentar subsidencia y levantamiento.

Como ilustra la Figura 15.H, cuando una estructura caliente se construye directamente sobre permafrost que contiene una elevada proporción de hielo, la descongelación produce un material esponjoso en el que el edificio se hunde. Una solución es colocar los edificios y



▲ **Figura 15.G** Cuando se construyó el ferrocarril a través de este paisaje de permafrost en Alaska, el suelo experimentó subsidencia. (Foto de Lynn A. Yehle, U. S. Geological Survey.)



▲ **Figura 15.H** Este edificio, localizado en el sur de Fairbanks, Alaska, experimentó subsidencia debido al deshielo del permafrost. Nótese que el lado derecho, con calefacción, se hundió mucho más que el porche de la izquierda, sin calefacción.

otras estructuras sobre montones, a modo de zancos, que permiten la circulación del aire subcongelado entre el suelo del edificio y el terreno manteniéndolo así congelado.

Cuando se descubrió petróleo en la vertiente norte de Alaska, mucha gente se preocupó ante la posibilidad de construir un sistema de tuberías que enlazara los campos petrolíferos de la bahía Prudhoe con el puerto carente de hielo de Valdez, 1.300 kilómetros al sur. Había serias

dudas con respecto a si un proyecto tan grande podría dañar el delicado ambiente del permafrost. Muchos se preocupaban también por la posibilidad de que se produjeran derrames de petróleo.

Dado que el petróleo debe calentarse hasta unos 60 °C para poder fluir de manera adecuada, tuvieron que desarrollarse técnicas de ingeniería especiales para aislar este calor del permafrost. Se utilizaron técnicas como el aislamiento de las tuberías, la elevación de fragmen-

tos del sistema de tuberías por encima del nivel del suelo e incluso la colocación de dispositivos de enfriamiento en el terreno para mantenerlo congelado. El sistema de tuberías de Alaska es claramente uno de los proyectos más complejos y costosos nunca construidos en la tundra ártica. Estudios detallados y una cuidada técnica de ingeniería contribuyeron a reducir al mínimo los efectos adversos resultantes de la perturbación del suelo congelado.

es incapaz de percolar en la capa de permafrost impermeable situada debajo. Como consecuencia, la capa activa se satura y fluye lentamente. El proceso puede ocurrir en pendientes de tan sólo 2 a 3 grados. Donde hay un manto bien desarrollado de vegetación, la lámina de soliflucción puede moverse en una serie de lóbulos bien definidos o en una serie de pliegues que se solapan en parte.

Deslizamientos submarinos

Como cabe imaginar, los procesos gravitacionales no están limitados al continente. El desarrollo de instrumentos de alta calidad que reproducen imágenes del fondo oceánico nos permite determinar que los procesos gravitacionales submarinos son un fenómeno común y extendido. Por ejemplo, en los estudios se revelan enormes deslizamientos submarinos en los flancos de la cadena Hawaiana, así como a lo largo de la plataforma y el talud continentales de Estados Unidos. De hecho, muchos deslizamientos submarinos, principalmente en forma de desplomes y avalanchas de derrubios, parecen mucho mayores que cualquier proceso gravitacional similar que suceda en el continente.

Entre los deslizamientos submarinos más espectaculares se cuentan los que tienen lugar en los flancos de los volcanes submarinos (denominados *montes submarinos*) y en las islas volcánicas como las Hawaia. En los flancos sumergidos de las islas Hawaia se han identificado docenas de grandes deslizamientos de más de 20 kilómetros de longitud. Algunos tienen dimensiones verdaderamente espectaculares. Uno de los más grandes que se han cartografiado, llamado la avalancha de derrubios de Nuuanu, se encuentra en el lado nororiental de Oahu. Se extiende a lo largo de casi 25 kilómetros a través del fondo oceánico y su tramo final se eleva por una pendiente de 300 metros, lo cual indica que debió de ser muy potente y tener un gran ímpetu. Este enorme deslizamiento transportó

bloques gigantescos a muchos kilómetros. Es probable que cuando ocurren acontecimientos tan grandes y rápidos, éstos produzcan olas marinas gigantes denominadas tsunamis que recorren el Pacífico*.

Los impresionantes deslizamientos submarinos descubiertos en los flancos de las islas Hawaia están relacionados con casi total seguridad con el movimiento del magma mientras un volcán está activo. A medida que se añaden grandes cantidades de lava al borde marino de un volcán, la acumulación de material acaba provocando un gran deslizamiento. En la cadena Hawaiana, parece que este proceso de crecimiento y hundimiento se repite a intervalos de 100.000 a 200.000 años mientras el volcán es activo.

A lo largo de los bordes continentales de Estados Unidos, grandes cicatrices de desplomes y flujo de derrubios marcan el talud continental. Estos procesos son consecuencia de la acumulación rápida de sedimentos inestables o de fuerzas como las olas de los temporales y los terremotos. Los procesos gravitacionales submarinos son especialmente activos cerca de los deltas, que son depósitos masivos de sedimentos en las desembocaduras de los ríos. Aquí, a medida que se acumulan grandes cantidades de arcilla saturada de agua y sedimentos ricos en material orgánico, se vuelven inestables y fluyen con facilidad incluso por las pendientes suaves. Algunos de estos movimientos han sido suficientemente energéticos para dañar grandes plataformas de perforación submarinas.

Los procesos gravitacionales parecen constituir una parte integral del crecimiento de los bordes continentales pasivos. Los sedimentos suministrados a la plataforma continental por los ríos se mueven a través de la plataforma hacia la parte superior del talud continental. Desde este punto, los desplomes, los deslizamientos y los flujos de derrubios hacen descender los sedimentos hacia el pie de talud o algunas veces más allá de éste.

* Para más información sobre estas olas destructivas, véase la sección sobre tsunamis del Capítulo 11.

Resumen

- Por *procesos gravitacionales* o movimientos de masa se entiende el movimiento descendente de rocas, el regolito y suelo bajo la influencia directa de la gravedad. En la evolución de la mayoría de las formas del paisaje, los procesos gravitacionales constituyen el paso siguiente a la meteorización. Los efectos combinados de los procesos gravitatorios y la erosión por las aguas de escorrentía producen los valles fluviales.
- *La gravedad es la fuerza que controla los procesos gravitacionales*. Otros factores que influyen o desencadenan los movimientos pendiente abajo son la saturación en agua del material, el exceso de pendiente de las laderas, más allá del *ángulo de reposo*, la eliminación de la vegetación y el temblor de tierra producido por los terremotos.
- Los diversos procesos que se incluyen dentro de la clasificación de procesos gravitacionales se dividen y describen en función de: (1) el tipo de material implicado (derrubios, barro, tierra o roca); (2) el tipo de movimiento (desprendimiento, deslizamiento o flujo), y (3) la velocidad del movimiento (rápido o lento).
- Entre las formas más rápidas de los procesos gravitacionales se encuentran los *desplomes*, deslizamientos hacia abajo de una masa de roca o de material no consolidado que se mueve como una unidad a lo largo de una superficie curva; los *deslizamientos de roca*, bloques de roca que se sueltan y deslizan pendiente abajo; los *flujos de derrubios*, flujos relativamente rápido de suelo y regolito que contienen una gran cantidad de agua; los *flujos de tierra*, flujos no confinados de suelo saturado rico en arcilla que se producen la mayor parte de las veces en la ladera de una colina, en un área húmeda después de precipitaciones densas o del deshielo de la nieve.
- Las formas más lentas de los procesos gravitacionales son la *reptación*, movimiento colina abajo gradual de suelo y regolito, y la *soliflucción*, flujo gradual de una capa superficial saturada por debajo de la cual se extiende una zona impermeable. Los lugares comunes para la soliflucción son regiones situadas por encima del *permafrost* (suelo permanentemente helado asociado de la tundra y con los casquetes polares).
- Los procesos gravitacionales no están limitados a los continentes; también se producen debajo del agua. Muchos *deslizamientos submarinos*, especialmente desplomes y avalanchas de derrubios, son mucho mayores que los que se producen en el continente.

Preguntas de repaso

1. Describa cómo los procesos gravitacionales contribuyen al desarrollo de los valles fluviales.
2. ¿Cómo contribuyó la formación de un dique al desastre del cañón Vaiont? ¿Era inevitable el desastre? (véase Recuadro 15.1)
3. ¿Cuál es la fuerza que controla los procesos gravitacionales?
4. ¿Cómo afecta el agua a los procesos gravitacionales?
5. Describa la importancia del ángulo de reposo.
6. ¿De qué manera la eliminación de la vegetación por los incendios o el talado fomenta los procesos gravitacionales?
7. ¿Qué relación tienen los terremotos con los deslizamientos?
8. Distinga entre desprendimiento, deslizamiento y flujo.
9. ¿Por qué pueden moverse las avalanchas rocosas a velocidades tan grandes?
10. Tanto los desplomes como los deslizamientos de roca se mueven por deslizamiento. ¿En qué se diferencian estos procesos?
11. ¿Qué factores indujeron el deslizamiento masivo de rocas en el Gros Ventre, Wyoming?
12. Explique por qué construir una casa en un abanico aluvial puede no ser una buena idea (véase Recuadro 15.3).
13. Compare y contraste las coladas de barro y los flujos de tierra.
14. Describa los procesos gravitacionales que ocurrieron en el monte Santa Elena durante su período activo de 1980 y en el Nevado del Ruiz en 1985.
15. Dado que la reptación es un proceso imperceptiblemente lento, ¿qué signos pueden indicar que este fenómeno está afectando a una pendiente?
16. ¿Qué es el permafrost? ¿Qué parte de la superficie terrestre es afectada?
17. ¿Durante qué estación del año se produce la soliflucción en las regiones con permafrost?

Términos fundamentales

ángulo de reposo	deslizamiento de derrubios	flujo	permafrost
avalancha de rocas	deslizamiento de rocas	flujo de derrubios	proceso gravitacional
colada de barro	desplome	flujo de tierra	reptación
deslizamiento	desprendimiento	lahar	soliflucción

Recursos de la web



La página Web *Earth* utiliza los recursos y la flexibilidad de Internet para ayudarle en su estudio de los temas de este capítulo. Escrito y desarrollado por profesores de Geología, este sitio le ayudará a comprender mejor esta ciencia. Visite <http://www.librosite.net/tarbuck> y haga clic sobre la cubierta de *Ciencias de la Tierra, octava edición*. Encontrará:

- Cuestionarios de repaso en línea.
- Reflexión crítica y ejercicios escritos basados en la web.
- Enlaces a recursos web específicos para el capítulo.
- Búsquedas de términos clave en toda la red.

<http://www.librosite.net/tarbuck>