

12

Laderas y

pendientes naturales

12.1 Introducción

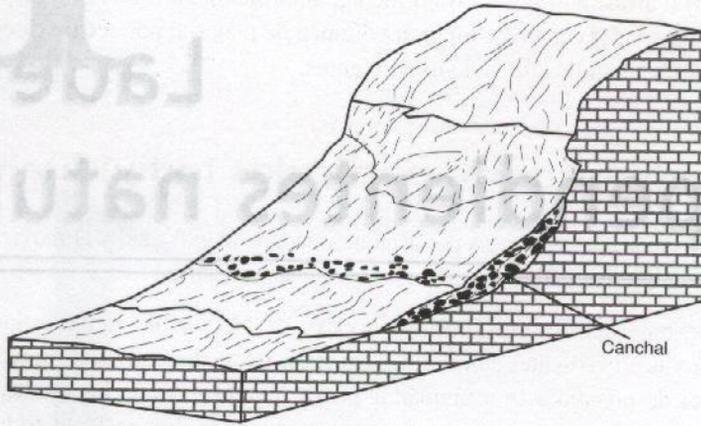
Las zonas inclinadas de la superficie terrestre se conocen con el nombre general de laderas o vertientes. Su génesis puede estar relacionada con procesos gravitacionales, fluviales, glaciares, eólicos, etc. No obstante, en nuestras latitudes casi todas las laderas que se observan son consecuencia de procesos gravitacionales y fluviales. Las laderas son una de las formas básicas del paisaje, siendo muy importantes desde un punto de vista aplicado, por ejemplo en la planificación de todo tipo de obras de ingeniería civil, o en el estudio de los procesos de arrastre del suelo. Esta importancia radica en que las laderas son con frecuencia zonas inestables, en las que el material situado en la parte superior tiende a ser transportado hacia abajo por procesos que a veces son muy rápidos, causando enormes daños materiales en las infraestructuras e incluso pérdida de vidas humanas.

El estudio de las laderas engloba dos aspectos fundamentales: de un lado, el estudio teórico que se ocupa de su génesis y evolución, y de otro, el estudio práctico que está dirigido a su corrección y estabilización.

12.2 Perfil de las laderas

Las laderas presentan por lo general un perfil en el que se pueden distinguir tres partes: una parte alta convexa, una parte intermedia rectilínea y una parte inferior cóncava (Figura 12.1). En cada una de estas partes dominan procesos distintos; así, mientras que en la parte superior dominan los procesos de erosión, en la parte intermedia domina el transporte, y en la parte inferior se suelen formar depósitos con los materiales provenientes de las partes más altas. Por la acción de estos procesos, la ladera tiende a suavizar su perfil con el tiempo (disminución de pendiente). No obstante, si la región es tectónicamente activa, las laderas pueden aumentar su inclinación media, fundamentalmente mediante la formación de escarpes de falla. Por lo tanto, la forma de una vertiente va a ser función de la interacción entre procesos tectónicos, que tienden a formar nuevo relieve, y procesos superficiales (meteorización, erosión, transporte y sedimentación), que tienden a destruir o suavizar los relieves existentes. Si suponemos nula la actividad tec-

tónica, los distintos procesos superficiales aparecen a su vez interrelacionados y condicionados por la litología, el clima y la cobertura vegetal.



■ **Figura 12.1** Perfil general de una ladera. Los derrubios acumulados al pie constituyen un canchal.

12.2 Transporte en las laderas

El material transportado en las laderas se genera por meteorización del sustrato rocoso, lo que genera una cobertura de material suelto o poco cohesivo, apto para ser movilizado ladera abajo. Sin embargo, en ocasiones se puede movilizar el propio sustrato rocoso en bloques más o menos grandes; como veremos más adelante, esto puede ocurrir en diversas circunstancias, por ejemplo, en laderas muy escarpadas y constituidas por rocas cohesivas, o en laderas no muy escarpadas pero constituidas por un sustrato rocoso blando.

El transporte de material en las laderas puede ocurrir en el seno de una corriente (acuosa generalmente, aunque eventualmente podría ser de hielo), o bien por acción directa de la gravedad. En este último caso, es bien sabido que sobre cualquier partícula suelta situada en pendiente actúa una fuerza que tiende a hacerla caer; dicha fuerza es igual a la componente tangencial del peso, es decir, el peso de la partícula por el seno del ángulo de inclinación de la ladera. Cuando esta fuerza supera la fuerza de rozamiento (componente normal del peso por el coeficiente de rozamiento entre la partícula y la ladera), la partícula se deslizará ladera abajo. Si el material no está suelto en la ladera, además habrá de vencerse su cohesión. Combinando todos estos términos, se llega a la ecuación de Coulomb, que gobierna el movimiento de materiales en una ladera; dicha ecuación puede escribirse como sigue:

$$\tau = Co + \mu\sigma_n$$

donde, τ es la componente tangencial del peso, $\tau = P \operatorname{sen}\alpha$; P es el peso y α el ángulo de inclinación de la ladera;

Co es la cohesión del material;

μ es el coeficiente de rozamiento; y

σ_n es la componente normal del peso; $\sigma_n = P \operatorname{cos}\alpha$.

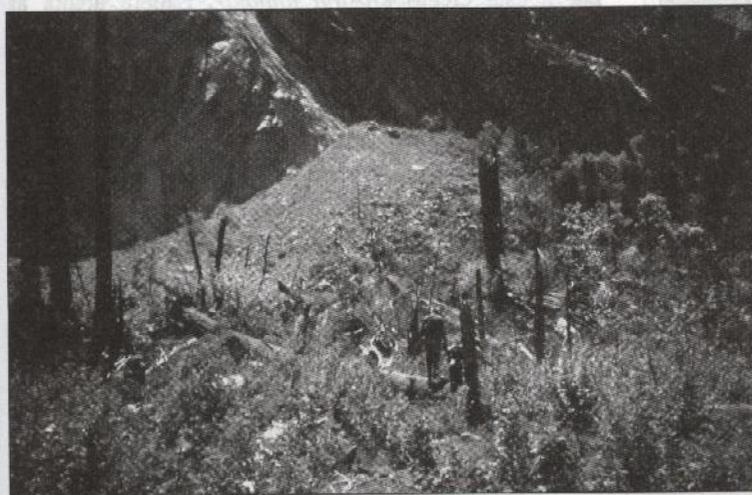
Vamos a considerar dos grandes grupos de movimientos en las laderas: movimientos de partículas individuales y movimientos en masa. Los primeros son movimientos de material suelto de tamaño de grano muy variable (milímetros a metros cúbicos), que se mueve ladera abajo por acción directa de la gravedad (caída de rocas) o arrastrado por un flujo (de agua normalmente). Los movimientos en masa consisten en desplazamientos ladera abajo de un gran volumen de material por acción directa de la gravedad. A continuación se examinan ambos tipos de movimientos.

12.3.1 Movimientos de partículas individuales

Trataremos separadamente la caída de rocas por acción directa de la gravedad y el movimiento en el seno de los flujos superficiales de agua, a lo que llamaremos arrastre superficial.

a) Caída de rocas: Se trata del desprendimiento sucesivo de bloques de forma aislada o en avalancha. Generalmente se producen vertientes constituidas por rocas resistentes sin recubrimiento y con pendientes fuertes. Los bloques desprendidos se acumulan al pie de la ladera, dando lugar a depósitos muy heterométricos y de cantos angulosos que se suelen denominar canchales (Figura 12.1). Si la caída se canaliza a través de un torrente, el canchal tendrá forma de abanico visto en planta (Figura 12.2). La pendiente superficial de los canchales oscila generalmente entre el 30° y 40° , siendo su perfil más o menos rectilíneo (Figura 12.3); la base suele ser una superficie cóncava. No todas las partículas del canchal tienen necesari-

amente que proceder de la caída de rocas, sino que pueden contribuir otros tipos de transporte; así por ejemplo, en climas fríos, los bloques del canchal pueden ser arrastrados en el seno de corrientes ocasionales de hielo.

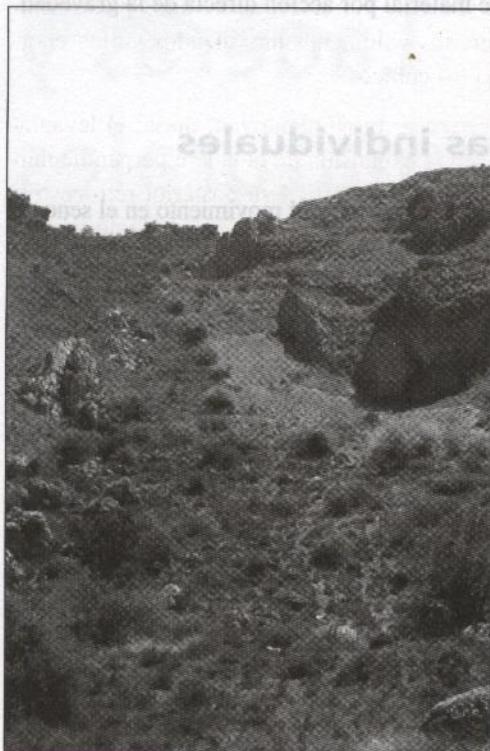


■ **Figura 12.2** Canchal con forma de abanico. Este canchal se generó en relación con un gran desprendimiento de rocas graníticas en el Parque de Yosemite (California, Estados Unidos) ocurrido el 10 de julio de 1996. Se desprendieron dos grandes bloques que cayeron desde una altura de 665 metros, desintegrándose en bloques métricos al chocar contra el pie de la ladera. El desprendimiento duró 14 segundos y produjo un golpe de viento que llegó a superar los 110 km/h de velocidad, el cual, a su vez, destruyó el bosque en distancias de hasta 500 metros del pie de la ladera.

La caída de rocas está fuertemente controlada por la presencia de fracturas (diaclasas y fallas) en el material que constituye la ladera, de modo que los bloques de roca se desgajan del sustrato a través de esos planos de discontinuidad; asimismo, las superficies de estratificación en las rocas sedimentarias actúan en ocasiones como discontinuidades a través de las cuales se produce el desprendimiento de bloques. En cuanto a los factores desencadenantes de la caída de rocas, se ha observado que pro-

cesos hielo-deshielo en fracturas pueden tener una gran influencia; esto explicaría que la caída de rocas esté concentrada en las estaciones más húmedas, cuando hay disponibilidad de agua para que ocurran los fenómenos de hielo-deshielo.

b) Procesos de arrastre superficial: Como ya se ha dicho se trata del desplazamiento vertiente abajo de las partículas más superficiales del suelo por la acción del agua; concretamente, se pueden distinguir dos procesos como responsables del arrastre del suelo: (I) el impacto de las gotas de lluvia y (II) la escorrentía superficial.



■ **Figura 12.3** Canchal al pie de una ladera constituida por rocas carbonatadas.

I) Impacto de las gotas de lluvia: Las gotas de lluvia al chocar contra las partículas sueltas del suelo de la ladera generan un desplazamiento diferencial de las mismas hacia abajo. Este proceso es efectivo sobre partículas de tamaño de grano arena y la máxima eficacia se consigue con lluvias tormentosas y en laderas desprovistas de cobertera vegetal.

II) Escorrentía superficial: Se denomina así a los flujos de agua superficiales provenientes de la precipitación no infiltrada. Este agua inicialmente circula como una película más o menos homogénea que cubre toda la superficie de la ladera y que se denomina *arroyada en manto*. Este proceso produce arrastre en la capa más superficial del suelo, eliminando sucesivamente niveles situados a mayor profundidad inicial; se suele denominar a este efecto *erosión laminar*. Ladera abajo, al aumentar el caudal el agua de escorrentía se organiza en pequeños canales o surcos; a este proceso se denomina *arroyada en surcos* y suele producir una importante erosión lineal (Figura 12.4). Estos procesos de arrastre del suelo por efecto de la escorrentía superficial son efectivos en regiones con escasa o nula cubierta vegetal y con lluvias intensas, es decir, en regiones áridas y semiáridas.



■ **Figura 12.4** Surcos y cárcavas en una ladera constituida por arcillas y limos escasamente cementados. La escasa cobertera vegetal favorece la formación de estos rasgos, indicativos de unas elevadas velocidades de erosión lineal.

* 12.3.2 Movimientos en masa

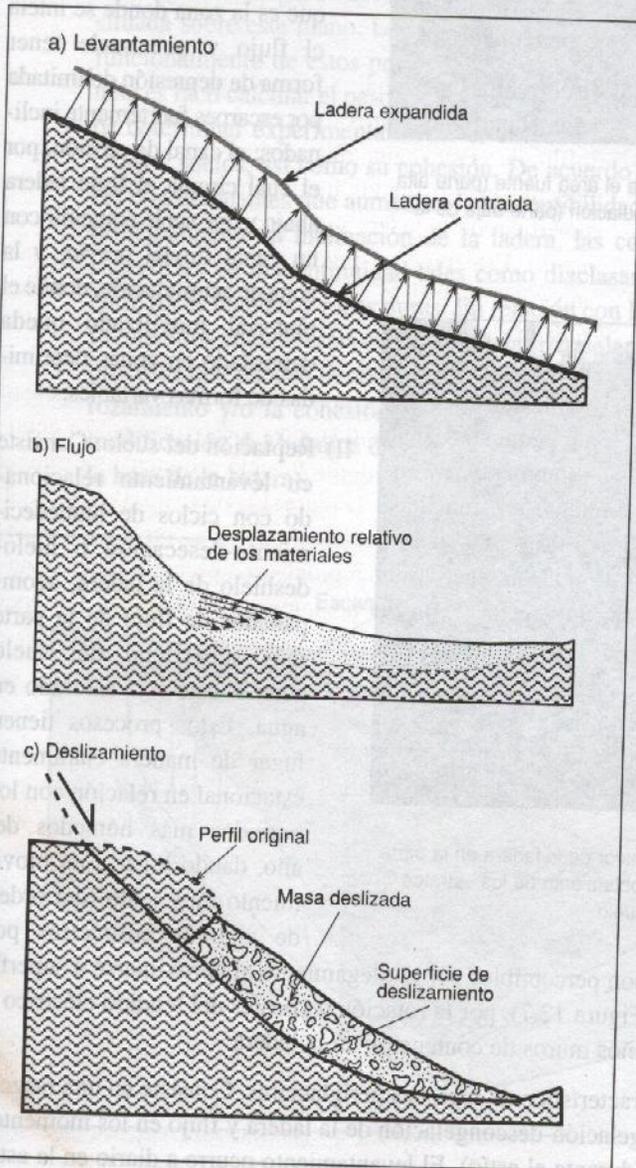
Este tipo de movimientos consiste en el desplazamiento ladera abajo de grandes volúmenes de material del suelo y/o sustrato rocoso debido a la acción de la gravedad y sin la participación directa de una corriente de agua o hielo. Las velocidades de estos procesos son muy variables, desde unos pocos milímetros por año a decenas de kilómetros por hora; igualmente, los volúmenes movilizados varían enormemente desde decenas de metros cúbicos hasta algún kilómetro cúbico.

Vamos a considerar tres tipos de procesos que pueden provocar movimientos en masa: el levantamiento, el flujo y el deslizamiento. El levantamiento consiste en la expansión de la ladera perpendicularmente a su perfil y su posterior retroceso al estado inicial según un movimiento de descenso vertical (Figura 12.5 a); esto provoca un movimiento diferencial de las partículas ladera abajo.

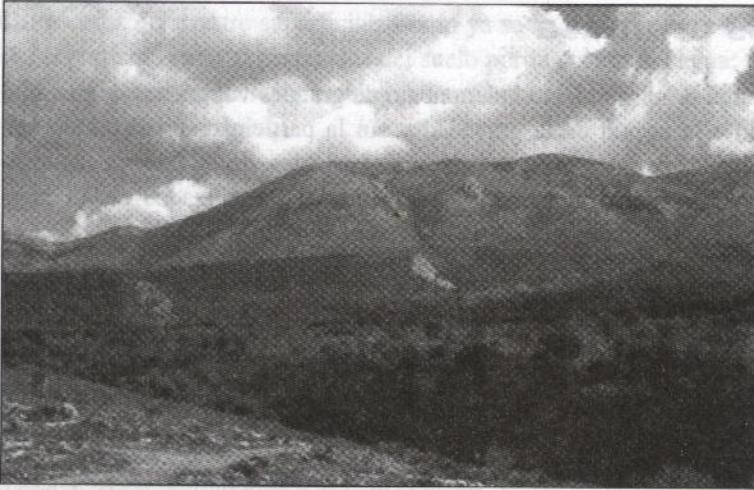
Estos movimientos se generan por procesos de humedecimiento y desecación de las laderas, o bien por ciclos de hielo-deshielo del agua contenida en el suelo. El flujo consiste en movimientos intergranulares que ocurren en materiales sueltos o de escasa cohesión y en presencia de agua en un porcentaje variable; el material en movimiento se comporta como una masa viscosa en la que los desplazamientos son máximos cerca de la superficie y se atenúan progresivamente en profundidad (Figura 12.5 b). El deslizamiento es el movimiento de una masa sobre una superficie basal que concentra todo el movimiento (Figura 12.5 c).

Conviene aclarar que muchos movimientos naturales van a ser mezcla de estos tipos extremos, por lo que resulta bastante difícil establecer una clasificación totalmente satisfactoria. A continuación vamos a tratar someramente los movimientos más comunes en la naturaleza, haciendo hincapié en los procesos y tipos de materiales implicados y en los rasgos geomorfológicos resultantes.

D) Flujos de derrubios y de suelos: Son movimientos rápidos que pueden recorrer largas distancias y desplazar volúmenes grandes de material. El mecanismo que domina estos movimientos es el flujo, diferenciándose dos tipos en función del tamaño de grano del material afectado:



■ **Figura 12.5** Esquemas para ilustrar los tres mecanismos que producen movimientos en masa en las laderas.



■ **Figura 12.6** Imagen de un flujo en el que se aprecia el área fuente (parte alta del torrente), el canal de erosión y la zona de acumulación (parte baja de la ladera, zona sin vegetación).



■ **Figura 12.7** Flexión de los estratos de pizarra a favor de la ladera en la parte superficial de la cuneta de una carretera. Este doblamiento de los estratos se debe a la reptación del suelo.

año) del suelo. Los efectos de la reptación son perceptibles por el plegamiento al aproximarse a superficie de marcadores como la estratificación (Figura 12.7), por la rotación de postes del tendido eléctrico o por la deformación y hundimiento de pequeños muros de contención en la ladera.

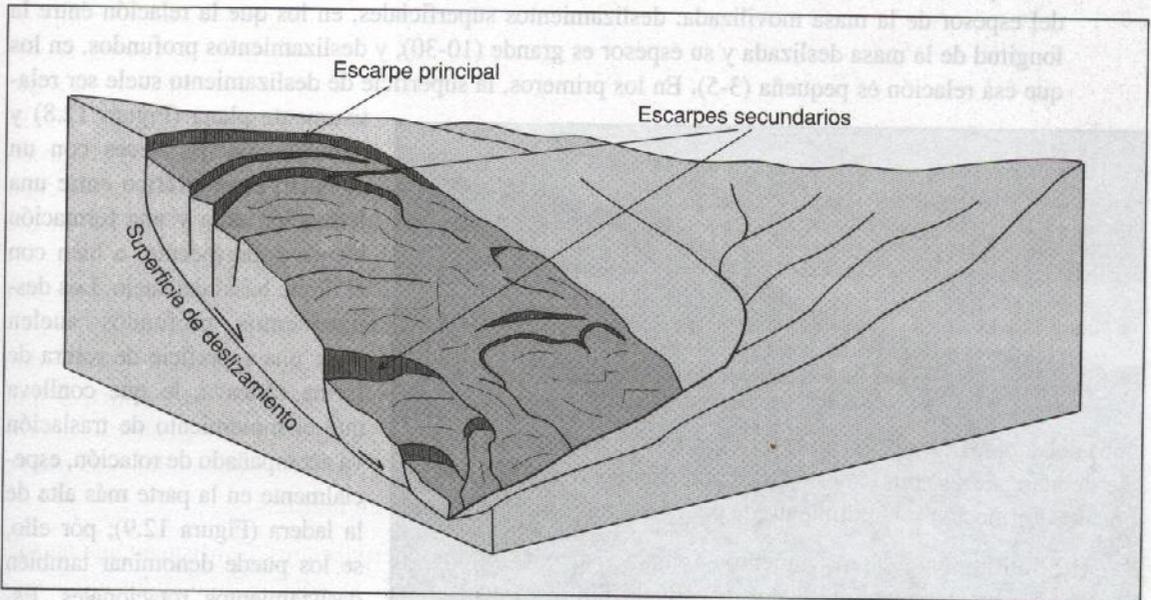
III) Solifluxión: Este movimiento es característico de regiones periglaciares. Consiste en una mezcla de levantamiento por ciclos de congelación-descongelación de la ladera y flujo en los momentos en que el suelo está descongelado (durante el estío). El levantamiento ocurre a diario en la estación estival durante la cual la parte más superficial del suelo se congela de noche y se descongela de día; además, hay un levantamiento de periodicidad anual producido por la congelación total

los flujos de suelos con tamaños finos y los flujos de derrumbios con una mezcla de tamaños finos y gruesos; además, la masa movilizada suele estar saturada en agua. Desde un punto de vista morfológico, los flujos se manifiestan por tres partes bien delimitadas (Figura 12.6): el área fuente, que es la zona donde se inicia el flujo y que suele tener forma de depresión delimitada por escarpes fuertemente inclinados; el canal de erosión, por el cual circula el flujo ladera abajo y que suele coincidir con un canal fluvial previo; y la zona de acumulación, donde el material movilizado queda depositado en zonas deprimidas de formas variables.

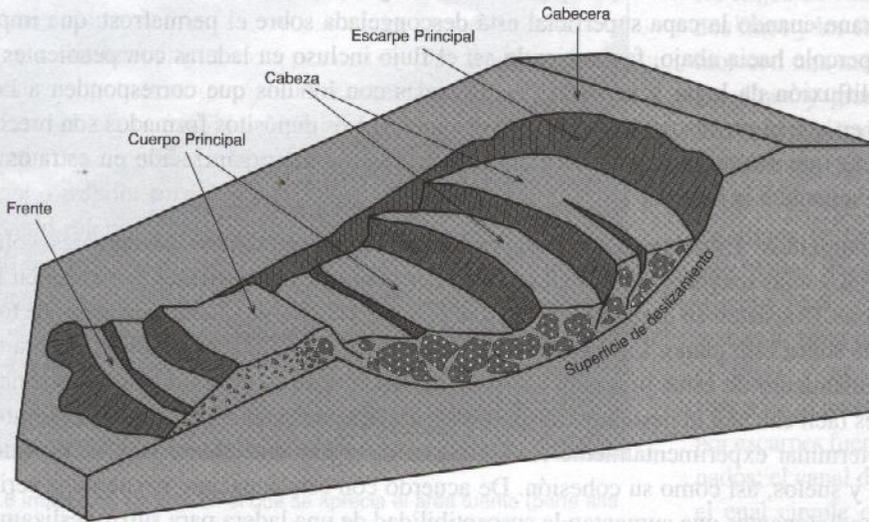
II) Reptación del suelo: Consiste en levantamiento relacionado con ciclos de humedecimiento-deseccación o hielodeshielo de la ladera, acompañados de flujo de la parte más superficial del suelo cuando éste está saturado en agua. Estos procesos tienen lugar de manera claramente estacional en relación con los periodos más húmedos del año, dando lugar a un movimiento muy lento (del orden de algunos milímetros por

del suelo durante el invierno y su posterior descongelación al comienzo del verano. El flujo se da en verano cuando la capa superficial está descongelada sobre el permafrost, que impide que el agua percole hacia abajo, favoreciendo así el flujo incluso en laderas con pendientes pequeñas. La solifluxión da lugar a vertientes escalonadas con lóbulos que corresponden a las distintas zonas en que el proceso avanza con mayor rapidez. Los depósitos formados son brechas heterométricas que muestran una cierta granclasificación y una organización en estratos inclinados paralelamente a la ladera.

IV) Deslizamientos: Éstos son los movimientos que suelen movilizar los mayores volúmenes de material y a las mayores velocidades, por lo que son los que más daños provocan en las infraestructuras. Consisten en la rotura de la ladera por un plano basal y la movilización de toda la masa situada sobre este plano. La ecuación de Coulomb es especialmente ilustrativa para entender el funcionamiento de estos procesos, ya que al producirse el desplazamiento sobre una superficie neta es fácil calcular el peso movilizado y sus componentes tangencial y normal. También es fácil de determinar experimentalmente el coeficiente de rozamiento interno de los distintos tipos de rocas y suelos, así como su cohesión. De acuerdo con esta ecuación, existen una serie de factores condicionantes que aumentan la susceptibilidad de una ladera para sufrir deslizamientos; son principalmente la inclinación de la ladera, las condiciones hidrogeológicas y la presencia de superficies de discontinuidad tales como diaclasas, fallas, planos de estratificación y contactos entre rocas blandas y rocas duras. En relación con las discontinuidades, los deslizamientos se ven favorecidos cuando éstas están inclinadas paralelamente a la ladera. También existen una serie de procesos que pueden desencadenar los deslizamientos, bien por una reducción del coeficiente de rozamiento y/o la cohesión de los materiales (periodos de lluvias intensas, terremotos) o por modificación del balance de fuerzas (obras que modifican la geometría de la ladera, erosión en la base de la ladera).

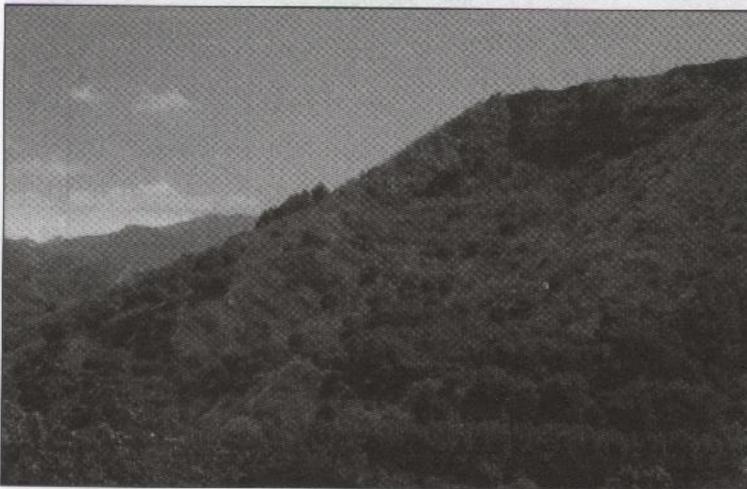


■ **Figura 12.8** Esquema de un deslizamiento superficial. La superficie de deslizamiento es plana y subparalela a la ladera.



■ **Figura 12.9** Esquema de un deslizamiento profundo, en el que se indican las distintas partes.

Los deslizamientos pueden dividirse en función del tipo de material movilizado y de la geometría de la superficie basal de movimiento. Respecto del tipo de material, se puede distinguir entre deslizamientos rocosos, que afectan a rocas coherentes, y deslizamientos de tierra que afectan a suelos y rocas no coherentes; también existen deslizamientos compuestos tanto por rocas coherentes como por suelos y/o rocas blandas. Respecto de la geometría, se establecen dos tipos en función del espesor de la masa movilizada: deslizamientos superficiales, en los que la relación entre la longitud de la masa deslizada y su espesor es grande (10-30), y deslizamientos profundos, en los que esa relación es pequeña (3-5). En los primeros, la superficie de deslizamiento suele ser relativamente plana (Figura 12.8) y coincide muchas veces con un contacto estratigráfico entre una formación dura y una formación blanda suprayacente, o bien con el límite basal del suelo. Los deslizamientos profundos suelen tener una superficie de rotura de forma cóncava, lo que conlleva que el movimiento de traslación va acompañado de rotación, especialmente en la parte más alta de la ladera (Figura 12.9); por ello, se los puede denominar también deslizamientos rotacionales. Estos deslizamientos dan lugar a rasgos morfológicos bastante característicos (Figura 12.10),



■ **Figura 12.10** Aspecto de campo de un antiguo deslizamiento. La parte más alta y escarpada de la ladera corresponde a la cabecera. La masa deslizada aparece como un lóbulo al pie de la ladera.

Estos deslizamientos dan lugar a rasgos morfológicos bastante característicos (Figura 12.10),

distinguiéndose por lo general las siguientes partes (Figuras 12.9 y 12.10): la cabecera, que es el límite superior de la masa desplazada; el escarpe principal, que es la intersección con la topografía de la superficie de rotura y que suele ser muy empinado y con forma tendente a semicircular; la cabeza, que es la parte más alta de la masa desplazada; el cuerpo principal, que es la masa principal del deslizamiento; y el frente o pie, que es la parte inferior. La superficie de rotura intersecciona a la superficie original de la ladera al final del cuerpo y a partir de este punto la masa movilizada se desplaza por la superficie de la ladera, generando a veces varios lóbulos o lenguas en la parte más baja del pie. Esta parte más baja suele estar compuesta por materiales blandos sueltos con elevado porcentaje de agua y en su movimiento suele haber una componente de flujo importante. En cambio, la cabeza suele estar compuesta de rocas más duras, que dan lugar a grandes bloques rotados, en ocasiones delimitados por escarpes secundarios.

Procesos fluviales

Temas a evaluar del capítulo 12 LADERAS PENDIENTES NATURALES.

Orozco, M. et al, 2004, Geología Física. Editores Thomson España.

QE28.2

G465

- 1.- Concepto e importancia de las laderas y vertientes.
- 2.- Partes y Procesos de un perfil de laderas.
- 3.- Concepto, tipos y descripción de movimientos de partículas individuales.
- 4.- Concepto, tipos y descripción de movimientos en masa.