



Son los movimientos de la roca y del material no consolidados, en respuesta a la atracción de la gravedad. El agua, el hielo y el viento son agentes geológicos de erosión. Aunque los medios de transporte son variados; entre los principales figuran los ríos.

Los agentes de estos procesos externos están impulsados fundamentalmente por dos fuerzas: la energía del Sol y la gravedad. Estos procesos actúan en sentido inverso a procesos internos que regeneran el relieve.

Son varias las causas que condicionan el modelado de las rocas y las distintas morfologías. Entre éstas podríamos destacar tres: la tectónica, la climatología y el tipo de roca.

Las fuerzas internas son las principales responsables de las formas a gran escala que se observan sobre la superficie del planeta, como cordilleras y depresiones. Aparece aquí la climatología influenciando los agentes geológicos externos que provocan erosión. En las regiones montañosas frías el hielo, en las regiones áridas el viento y por una y otra parte el agua, que es el principal agente modelador de las regiones templadas.

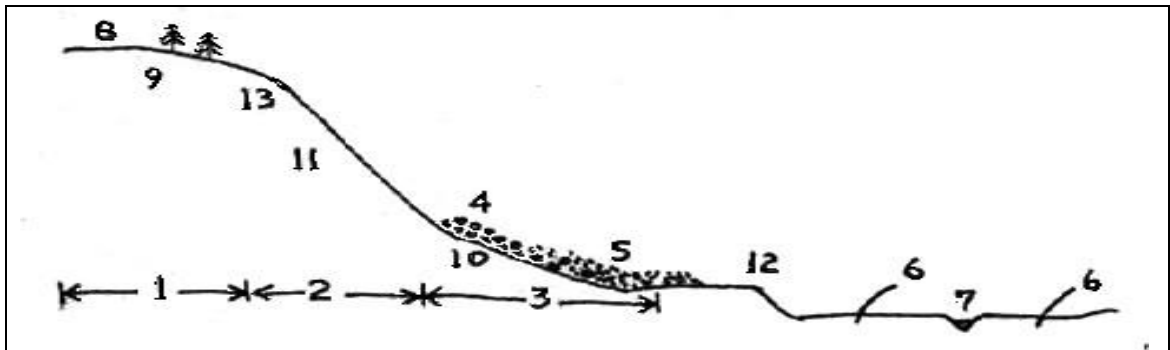


Figura 100. Perfil idealizado de una ladera: 1. zona de infiltración, 2. ladera desnuda, 3. ladera de acumulación, 4. talus, 5. coluviones, 6. aluviones, 7. río, 8. interfluvio, 9. ladera convexa, 10. Ladera cóncava, 11. Ladera recta, 12. Borde de cauce. Adaptado de Manuel García López, curso de estabilidad de taludes, U. Nal.

Como el fenómeno de la erosión por corrientes de agua, y por glaciares y desiertos, se verá adelante, sólo se considera en este aparte el de los movimientos de masas por ser estos los más significativos cuando se evalúan las amenazas naturales en zonas de montaña.

16.1 PARAMETROS Y PROCESOS DE INESTABILIDAD

El movimiento de masas ocurre cuando el esfuerzo cortante supera la resistencia al corte del suelo. Esto puede ocurrir al aumentar el esfuerzo cortante (sismos, variaciones morfológicas desfavorables, etc.) o al disminuir la resistencia al corte del suelo (saturación, meteorización, etc.).

16.1.1 Parámetros que influyen en el movimiento masal. Los parámetros que influyen en la inestabilidad de las masas son:

- El tipo de material (clase de rocas, capa alterada y tipo de cobertura).
- Pendiente (gradiente, forma y longitud de las laderas).

- Condiciones hidrológicas (infiltración, permeabilidad, profundidad del agua subterránea y cantidad de agua).
- Procesos morfológicos (erosión fluvial e hídrica y movimientos masales).
- Parámetros externos (como la distribución de la pluviosidad, es decir, relación intensidad-período, la sismicidad y el vulcanismo).

16.1.2 Procesos que facilitan el movimiento de masas. La gravedad proporciona la energía para el movimiento pendiente abajo de las masas de suelo. No obstante el movimiento se favorece por la acción del agua, por la geometría de los depósitos y por la naturaleza de los materiales. De ahí que los procesos que influyen la inestabilidad sean:

- **Resecamiento del suelo.** Si el exceso de agua provoca el deslizamiento, también la falta de agua. Al secarse el suelo, se contrae y se producen disyunciones perpendiculares a la dirección en que los vasos capilares van perdiendo agua. No se deben pavimentar los taludes para facilitarles el agua lluvia.
- **Saturación del material con agua.** No se promueve el movimiento por lubricación. La tensión superficial de la humedad da cierta cohesión al suelo, pero la fuerte lluvia obliga a la salida del aire de los poros destruyendo la tensión superficial y reduciendo la cohesión de la masa. Simultáneamente, con la saturación del suelo, el agua de los poros entra bajo presión y trata de apartar los granos individuales y unidades de roca, disminuyendo la fricción interna del material.
- **Modificaciones por erosión.** Porque altera la geometría del depósito, venciendo la pendiente crítica del talud o provocando la pérdida de su pata. También la deposición o sobrecarga de materiales erosionados interviene en la estabilidad de una masa al modificar la pendiente o al

generar esfuerzos adicionales en su interior, que alteren la estabilidad de los materiales.

Cuadro 20. Procesos de erosión hídrica e inestabilidad

Tipo	Acción	Consecuencia	Medidas
Pluvial (lluvia)	Impacto	Deslizamiento	Empradizado, mateado
	Escorrentía	Descubrimiento	Plantación protectora
	Infiltración		Captación y recubrimiento
Escorrentía (arroyamiento)	Difusa	Erosión laminar	Barreras vivas y colchones
	Concentrada	Surcos o cárcavas	Trinchos, gaviones
Fluvial (corrientes)	Lineal	Profundiza cauces y erosiona laderas	Obras de disipación y plantación protectora
	Areolar	Desgasta el relieve en los interfluvios	Obras transversales, reforestación
Eólica (viento)	Levantamiento	Descubrimiento	Mateado y plantaciones
	Abrasión	Desgaste	Barreras cortaviento vivas

Adaptado de Heber Soto y Carlos E. Escobar. Control de la erosión, Cramsa, 1984.

- **Variaciones del material y otros.** Como cambios en la naturaleza del suelo (por meteorización o por alteración natural o artificial de los materiales), esfuerzos dinámicos (sismos, tráfico, etc.), sobrecargas artificiales e intervención del hombre (talas, construcciones, etc.)

Cuadro 21. Perfil de un suelo residual.

FABRICA	N°	HORIZONTE	DESCRIPCION	AFALLAMIENTO
Fábrica Textural Heredada	VI --- V	Suelo residual	Suelo residual ----- roca completamente descompuesta	Erosión ----- Superficie Irregular
Fabrica Textural y Estructura l Heredada	IV --- III	Roca meteorizad a	Roca altamente descompuesta ----- roca modera/ descompuesta	Fallas planas, volcamientos y curvas ----- inicia el control estructural
Fábrica Estructura l Heredada	II --- I	Roca no meteorizad a	Roca débil/ descompuesta ----- roca fresca	Falla en cuña o planar, caída ----- Superficie curva en roca triturada

J. Montero. Estabilidad de taludes. Conferencia Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 1995.

16.1.3 El efecto de las lluvias torrenciales. Una condición importante de la estabilidad es el fenómeno de la lluvia y su intensidad. La precipitación media anual a lo largo de la zona andina colombiana varía entre 1300 mm y 2500 mm, con localidades de 5000 mm, y en la época lluviosa pueden darse entre 300 mm y 500 mm y en la seca entre 50 mm y 100 mm al mes.

En su mayor parte los deslizamientos se producen durante o inmediatamente después de lluvias de más de 50 mm o 100

mm/día, dependiendo de la zona. Las temporadas de lluvia, en nuestro clima colombiano son febrero 22 a marzo 21 y septiembre 21 a diciembre 22. Regiones como el Chocó, con precipitaciones diarias e intensas muestran mejor estabilidad que regiones de la zona cafetera con precipitaciones más espaciadas y menos intensas.

En los años más lluviosos, que coinciden con el fenómeno del Niño, terminando los períodos de lluvias, muchas precipitaciones producen deslizamientos. La razón, ya los suelos se encuentran saturados y las lluvias de finales del período lluvioso, que tengan suficiente intensidad, sirven de detonantes.

16.2 CAUSAS Y FACTORES DE LA INESTABILIDAD

Las causas de la inestabilidad pueden ser intrínsecas, detonantes y contribuyentes.

16.2.1 Causas intrínsecas. Las causas intrínsecas suelen ser naturales y se relacionan con las aguas subterráneas, con los materiales, con la tectónica, con la topografía abrupta, etc. En la evaluación de la amenaza estas causas pueden configurar los factores de la susceptibilidad del material al movimiento masal.

En las causas intrínsecas hay que tener en cuenta los siguientes **factores** inherentes a los materiales:

- Factores relacionados con la composición y fábrica textural (como textura mineral, de diques que intruyen la roca).
- Factores relacionados con el estado de alteración de los materiales o de degradación mecánica.
- Factores relacionados con la actitud estructural, es decir, con la disposición de los materiales los cuales pueden estar orientados, favorable o desfavorablemente.

- Cambios en el estado inicial de los esfuerzos.

Las causas detonantes pueden ser naturales como la lluvia, el sismo (evaluado en términos de aceleración de la gravedad) y la erosión, o artificiales como cortes, llenos, deforestación, etc. En la evaluación de la amenaza estos se constituyen en factores detonantes.

16.2.2 Causas detonantes. En los detonantes hay que tener en cuenta los órdenes de las amenazas. Las amenazas de primer orden no son causadas por otras amenazas pero pueden ser detonantes de las de segundo orden. Las de tercer orden son causadas por las de primero o segundo orden. Estas son:

- Primer orden: sismos, huracanes, erupciones volcánicas y lluvias.
- Segundo orden: deslizamientos, maremotos, inundaciones, sequías.
- Tercer orden: aludes, avalanchas, flujos.

16.2.3 Causas contribuyentes. Las causas contribuyentes son similares a las causas detonantes o a las intrínsecas, pero su acción se limita simplemente a la anticipación del evento. Son aquellas que afectan de alguna manera las propiedades intrínsecas del sistema o que agravan el factor detonante del evento. Por ejemplo la remoción del soporte (natural o artificial), el sobre empinamiento (por acción hídrica), las sobrecargas (construcciones, saturación, deposiciones).

En la evaluación de las causas contribuyentes hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- Factores relacionados con la composición de la roca.
- Factores relacionados con la degradabilidad de la roca.

- Factores relacionados con la estructura geológica.
- Factores por ambiente sismotectónico o volcánico.
- Factores antrópicos (sobrecargas, pérdida de soporte, manejo y alteración del drenaje, esfuerzos dinámicos, deforestación, mal uso y manejo del suelo).
- Factores climáticos (variaciones de la temperatura, máximas y mínimas, cantidad de lluvia, intensidad y distribución de las precipitaciones).

16.3 EVALUACION DE LA ESTABILIDAD

16.3.1 Resistencia al corte de los suelos. La resistencia a la cizalladura o corte, es el punto de partida para el tratamiento de los problemas de empuje de tierras contra estructuras de contención, de estabilidad de taludes de suelos en terraplenes y cortes, y de capacidad de soporte última de terrenos que han de servir de cimentación.

Los suelos están sometidos a esfuerzos de compresión, tracción y cizalladura como cualquier estructura, pero su resistencia a la falla por ruptura depende fundamentalmente de su resistencia a la cizalladura. Dado que la mayor parte de los suelos pueden soportar sólo pequeños esfuerzos de tracción, y que la resistencia a la falla por compresión pura es tan alta que no tiene importancia práctica, el interés del ingeniero se centra casi por completo a la resistencia al corte.

- **Ecuación de Coulomb.** Coulomb establece que un material falla cuando el esfuerzo cortante en una dirección dada de éste llega a igualar a la resistencia a la cizalladura en esa misma dirección, la cual depende de la cohesión y de la fricción interna entre los granos. La ecuación de Coulomb (1773) es la siguiente:

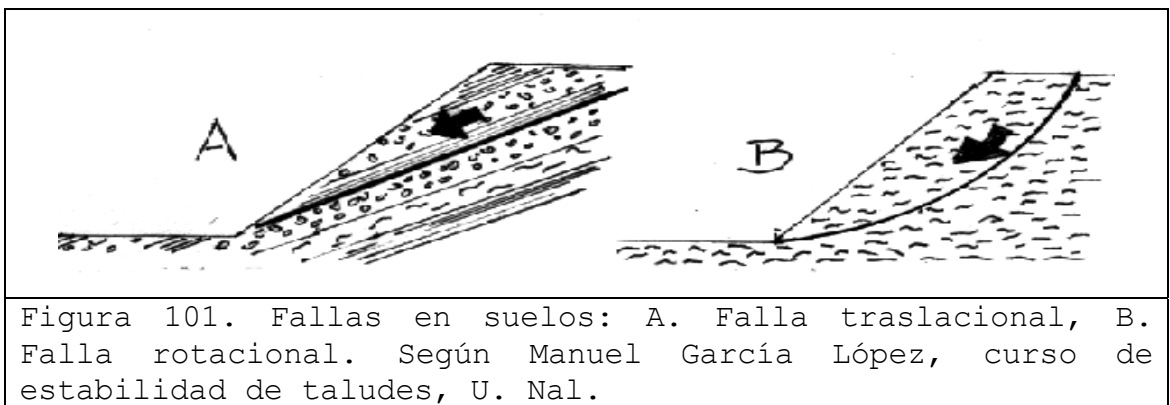
$$s = c' + \sigma' \tan \phi'$$

En la cual s es la resistencia al corte del suelo en un punto y una dirección dados, c es la resistencia efectiva por cohesión entre las partículas de suelo, $\sigma' \tan \phi'$ es la resistencia por fricción interna entre los granos, σ' es el esfuerzo efectivo normal a la dirección considerada, ϕ' el ángulo de fricción efectiva del suelo y $\tan \phi'$ el coeficiente de fricción interna del material.

En aquella fórmula se supone que la cohesión c' y la fricción $\tan \phi'$ son constantes e independientes. No son ni lo uno ni lo otro, pero tal ecuación es tan útil como simple, incluso en nuestros días.

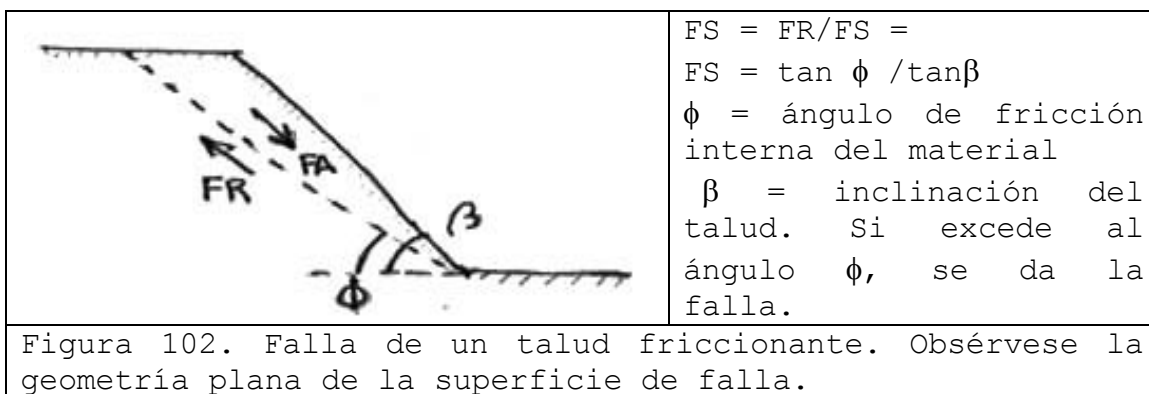
La cohesión c viene a ser la resistencia a la cizalladura τ del suelo bajo presión normal nula. Ella no existe entre granos de arena sin finos y en los limos es relativamente baja y aún nula. El ángulo de fricción interna ϕ resulta de la fricción mecánica directa entre granos y de la trabazón entre ellos.

16.3.2 Falla en taludes de suelo. Para comprender algo acerca del papel de la fricción y la cohesión en una masa de suelos, tomemos un talud que ha de fallar, no por deslizamiento superficial sino por movimiento del cuerpo del talud. Nos interesa el segundo caso donde la falla puede ser traslacional o rotacional según el tipo de suelo.

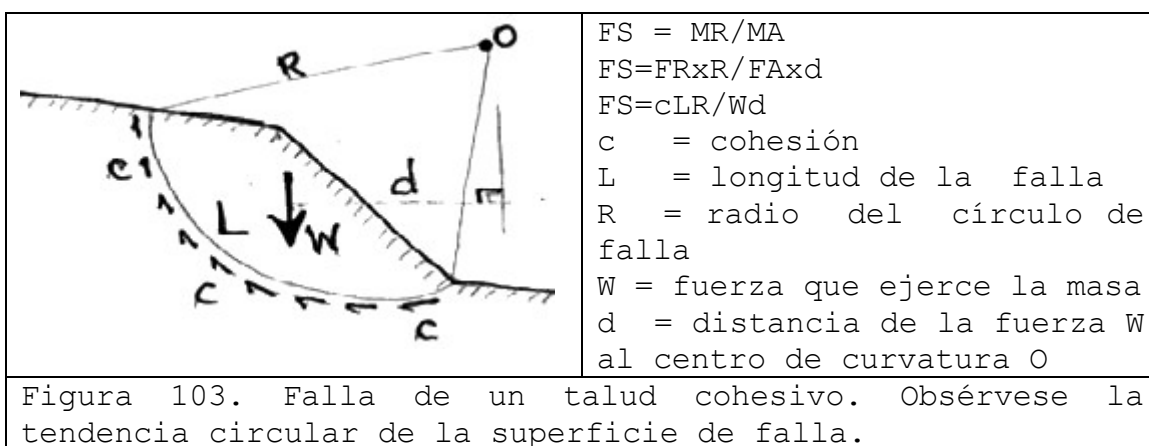


- **Suelos friccionantes.** Por ejemplo arenas. La falla en este caso es traslacional o plana.

El factor de seguridad FS está dado por el cociente entre las fuerzas resistentes FR y las fuerzas actuantes FA. Así, la estabilidad supone factores de seguridad mayores que uno.



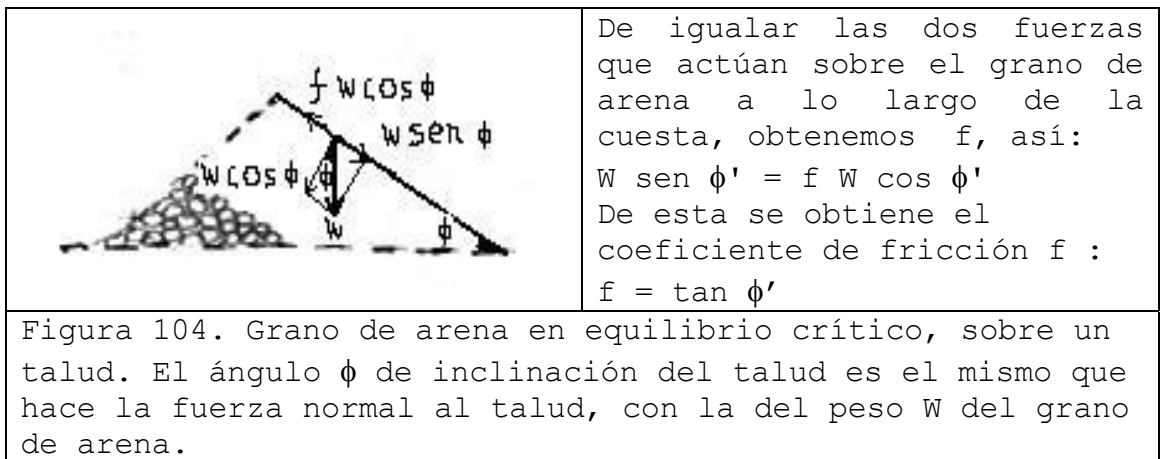
- **Suelos cohesivos.** Por ejemplo arcillas. La falla es rotacional y su geometría tiende a ser circular. El factor de seguridad FS está dado por el cociente entre el momento resistente MR de las fuerzas resistentes FR y el momento actuante MA de las fuerzas actuantes FA.



- **Angulo de fricción y fuerza de fricción.** Para encontrar la relación entre el ángulo ϕ de fricción interna y la

fuerza unitaria de fricción interna del material f , supongamos un depósito de arena de forma cónica, reposando sobre una superficie horizontal como muestra la figura 104.

Al verter los granos sin impulso la pendiente del talud alcanza un límite de estabilidad crítico bajo el ángulo ϕ' . Cualquier grano de peso W en la superficie del depósito estará sometido a un par de fuerzas en equilibrio: $W \sin \phi'$, como fuerza que actúa tratando de rodar el grano, en dirección paralela con la superficie del talud, y, $f W \cos \phi'$ como fuerza que se opone, sosteniendo el grano, y en dirección opuesta a la anterior, siendo $W \cos \phi'$ la componente del peso W que resulta normal a la superficie.



Se puede interpretar éste valor de f como el porcentaje de fuerza del peso W , que debe ser superado para provocar el volcamiento de cualquier grano sobre la superficie del depósito.

- Conclusión. Para el suelo friccionante donde la falla tiende a ser traslacional, el factor de seguridad es el cociente de fuerzas y lo crítico es la inclinación del talud; en los cohesivos, donde la falla tiende a ser rotacional, el factor de seguridad es el cociente de momentos y el factor crítico suele ser la altura del talud.

16.4 CLASIFICACION Y DESCRIPCION DE LOS MOVIMIENTOS DE MASAS

Es importante una taxonomía que explique los mecanismos de deslizamientos de tierra y roca en el medio tropical andino, pues los fenómenos naturales no se producen siempre de una misma manera regular y uniforme y bajo condiciones simples y homogéneas. Con una clasificación capaz de abarcar todas las especies y géneros del fenómeno se pueden elaborar modelos y teorías útiles en el análisis y cálculo de los fenómenos que han de ser prevenidos o corregidos.

16.4.1 Clasificación de los movimientos masales. Una primera aproximación, puede ser la de discriminar los flujos rápidos y los deslizamientos, es decir los fenómenos de transporte de masas y de desplazamiento de masas.

El **transporte** de masas se da en avalanchas, flujos, fenómenos de escurrimiento y deyección de materiales. Los **desplazamientos** de masas, se dan en fenómenos de reptación, desprendimientos, deslizamientos, subsidencias (cavernas de erosión y disolución) y propagación lateral de materiales.

Una segunda aproximación es la clasificación de los movimientos por su rapidez. Se consideran **movimientos rápidos** los deslizamientos de tierra, flujos de lodo, flujos de tierra y desarrollo de taludes. Se consideran **movimientos lentos** el resbalamiento, la solifluxión y los glaciares de roca.

Los **deslizamientos** pueden ser profundos (sin control estructural), caídas de detritos (con control estructural) y deslizamientos de rocas (con control estructural). Los deslizamientos pueden ser rotacionales (superficie de falla curva y suelo cohesivo) o traslacionales (superficie de falla plana y suelo friccionante).

La **reptación o reptamiento** (flujo lento) se reconoce por la ondulación del terreno, el desplazamiento de líneas de

acueducto, la inclinación de postes y árboles. La velocidad se excita en épocas de invierno aunque en los más profundos ésta es más uniforme. Hay reptación de suelos en zonas interfluviales (material inconsolidado y húmedo), reptación de rocas en capas inclinadas hacia valles y reptación de talus (fragmentos de roca acumulados en cantiles).

Los **escurrimientos** son derrumbes o colapsos de masas irregulares asociados a excavaciones lineales (vías canales). Los **desprendimientos** son volcamientos, caídas, saltamientos y rodamientos de rocas.

Los **flujos rápidos** pueden ser flujos de tierra (baja velocidad), flujos de lodo (velocidad moderada) y avalanchas de detritos (alta velocidad). Un flujo de tierra puede transformarse en un flujo de lodo si hay aportes de agua; los flujos de lodo son más rápidos pero no portan volúmenes significativos de piedra y los sólidos están dominados por finos. Las avalanchas son ya enormes y permiten diferenciar bien un canal o cuello que conecta una zona de alimentación y otra de descarga. También hay flujos de detritos que son rápidos a causa de las altas pendientes, con contenidos de agua y aportes de materiales gruesos, pero que no compiten con las avalanchas

16.4.2. Descripción de los movimientos masales. Se tratará de complementar la descripción de los movimientos, clasificados ellos de acuerdo a su velocidad, y se harán anotaciones relacionadas con el manejo o la prevención de algunos eventos.

- **Deslizamientos de tierra.** Los movimientos catastróficos y destructivos de roca y suelo, que son los ejemplos de movimientos de masa más espectaculares, conocidos vulgarmente como "deslizamientos de tierra", deben ser subdivididos en tres así:

Desplazamientos o fallas de pendientes. Son desplomes de masas que se desplazan como una unidad o serie de unidades;

estos movimientos dentro del campo elástico a lo largo de planos curvos, son típicos de terrazas.

- **Deslizamiento de roca.** Son de carácter rápido y repentino. Estos movimientos, los más catastróficos de todos, se dan a lo largo de los planos de debilidad de las unidades de roca.

- **Huaycos.** Escurrimientos superficiales asociados a saturación por lluvias torrenciales. La masa que involucra la cobertura de suelo meteorizada, se transforman en flujos de escombros; son frecuentes en laderas desprotegidas de sistemas radicales profundos o con pastos, sobre abruptas pendientes. La denominación es de origen Quechua.

Cuadro 22. Clasificación de los movimientos de suelos y rocas en regiones tropicales

	CLASE	COMO OCURRE	CUANDO OCURRE	COMO EVITAR
Movimiento plásticos	Reptación por las capas superficiales	Movi. lentos de rastreo, movilizándose sólo una parte de la resistencia al corte	Movimiento constante acelerado durante la época lluviosa	Impermeabilización de la superficie y drenaje superficial
O viscoso	Deslizamiento de "talus"	Movimientos continuos de antiguos depósitos de laderas	Corte hecho al pié de un "talus" durante la época lluviosa	Lo anterior más subdrenaje con drenes horizontales o galerías filtrantes
Deslizamientos a lo	Deslizamientos planos o traslaci	Asentamientos del manto relativamente delgado sobre	Rotura durante o después de precipitación	Lo mismo con cambio de configuración del talud,

	CLASE	COMO OCURRE	CUANDO OCURRE	COMO EVITAR
largo de superf. con cohesión y fricción	onales	la superficie de la roca de fondo	nes con más de 100 mm/día durante el invierno	canales colect., bermas en el pie y muros de contención.
	Deslizamientos rotacionales	Deslizamiento de suelos residuales o masa saprolítica, eventualmente con bloques de roca		
Deslizamientos estructurales de	Deslizamientos de cuñas o placas de roca	Deslizamiento a lo largo de discontinuidades planas	Rotura repentina durante o después de tormentas con más de 100 mm/día, pero no necesariamente	Anclaje de rocas y estructuras ancladas
Masas rocosas	Deslizamiento de masas rocosas muy fracturadas	Similar a los deslizamientos planares y rotacionales	Durante la época lluviosa	
	Caída de rocas	Desmoronamiento de bloques de roca (boulders)		

	CLASE	COMO OCURRE	CUANDO OCURRE	COMO EVITAR
Flujos rápidos	Flujo de masa barrosa	Erosión o licuación de camadas superficiales	Durante tormentas con precipitaciones de más de 50 mm/hora en épocas lluviosas de años secos	Si son moderados se construyen en la vaguada estructuras disipadoras para evitar la incorporación de Material del cauce
	Flujo de bloques de roca y "boulders"	Demolición de masas rocosas muy fracturadas		

Milton Vargas. Clasificación y mecanismos de deslizamiento de tierra y roca en zonas tropicales. Congreso Suramericano de mecánica de rocas, Santafé de Bogotá, 1982.

Para prevenir los deslizamientos de tierra se recomienda el recubrimiento de las laderas con pastos especiales, la siembra de árboles de bajo porte que no provoque rugosidad y que favorezca la infiltración; la transpiración abate el nivel freático estabilizando el terreno. Los drenes horizontales de penetración también abaten el nivel freático y su papel consiste en llevar la presión atmosférica al interior del talud, para recuperar la tensión superficial. En macizos con diaclasas favorables a la pendiente, se recomienda el anclaje de cuñas y la selección de la ladera adecuada para la fundación de bancas de vías, buscando planos de debilidad contrarios a la pendiente de la ladera.

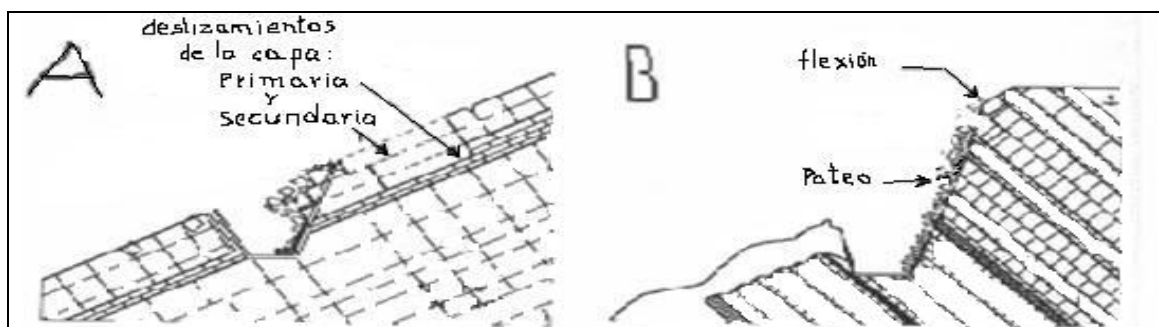


Figura 105. Selección de la ladera adecuada. Izquierda, Ladera en Macizo de Buzamiento conforme, Derecha, ladera en macizo de buzamiento contrario. Tomado y adaptado de Jaime Suárez, Deslizamientos.

La observación del estado de las coronas de los taludes y acantilados, particularmente en las zonas mineras y en regiones históricamente inestables, puede contribuir a la mitigación de los desastres. La construcción de obras de contención y defensa en el pie de las laderas amenazadas por corrientes de agua resulta de suma importancia.

- **Flujos de lodo.** Masas mezcladas de tierra, roca y agua en avalancha, que fluye con la consistencia del concreto. Se ocasionan por procesos de deshielo o por lluvia repentina en paisajes desérticos y no desérticos. Prototipo de este evento es el flujo que destruyó Armero en 1985 y el que destruyó la Planta de Gallinazo en Manizales en 1979. Estos eventos de gran recorrido, inundan finalmente los valles de salida de los ríos.

Hay monitores de flujos que se instalan en las vaguadas de los ríos con el propósito de generar alarmas tempranas para anticipar el aviso de eventos importantes que amenazan zonas pobladas aguas abajo de las corrientes. Consisten aquellos en cables horizontales tendidos transversalmente a una altura conveniente, para que flujos de cierta altura los revienten, interrumpen un circuito eléctrico y se genere una señal telemétrica de alarma.

- **Flujos de tierra.** Movimiento plástico de depósitos de tierra no consolidados, se diferencia de los anteriores porque el movimiento es muy lento pero perceptible. Los bloques conservados en la parte alta emulan a los desplomes, mientras las partes más bajas fluyen manteniendo su carácter plástico.

- **Fallas de taludes.** Son desprendimientos de fragmentos de roca provenientes de acantilados que caen en una serie de saltos libre, rebotes y deslizamientos. La pendiente del talud varía con el tamaño y forma de los fragmentos de roca, pero rara vez supera los 40° de inclinación con el horizonte.

- **Aludes.** Movimientos típicos de zonas estacionales causados en terrenos montañosos, dado que la pendiente crítica de la nieve es 20°. Cuando las laderas superan dicha inclinación, si no hay bosques o sistemas artificiales que generen rugosidad, durante el invierno, en caso de presentarse una mala estratificación de la nieve o de sobrevenir la acción del agua de deshielo por la llegada de la primavera, se provoca un alud de nieve, piedras, etc.

- **Resbalamiento o reptación.** Se da incluso en pendientes suaves y en climas templados y tropicales, cuando el material no consolidado, en estado húmedo, fluye sin dejar marcas superficiales sobre la cubierta vegetal, como fisuras o quiebres en la cubierta. Otras evidencias pueden anunciarlo, por el flujo los árboles y postes se inclinan y los pavimentos, conducciones y estructuras se agrietan y dislocan.

Tabla 19. Diferencia entre reptación y deslizamiento

Reptación			Deslizamiento		
Movimiento	lento	o	Se inicia	repentinamente	
progresivo	que	se presenta	cuando	los	esfuerzos de
cuando	se	supera	la	corte	superan la resistencia

Reptación	Deslizamiento
resistencia fundamental del material que es la resistencia a fluir	interna al corte del material
Sin superficie de falla. El movimiento es viscoso hacia la superficie y varía a plástico hacia la profundidad	El material se desplaza sobre la superficie de falla. Sin zona de transición (importante) al flujo plástico
Se debe a la gravedad combinada con otros fenómenos	Puede ser continuo o intermitente y se explica sólo por acción de la gravedad

J. Montero. Estabilidad de taludes. Conferencia Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 1995.

- **Solifluxión.** En el período de deshielo el agua se derrite de arriba hacia abajo quedando en el fondo una superficie que impide la percolación y por ende la masa de tierra saturada fluye. Otra forma de solifluxión, no periglaciaria, es la que se da en las zonas tropicales húmedas, cuando en las laderas de los montes embebidas de aguas fluye el suelo por debajo de las raíces.

- **Glaciares de roca.** Son largas lenguas de escombros rocosos. Se mueve la masa de las rocas, sugiriendo un comportamiento viscoso y al pie de los acantilados, cuando recibe por carga los nuevos bloques producto de la acción de las olas, del hielo, etc., según el lugar donde se encuentren.

- **Licuación.** Se da en depósitos no consolidados (sobre todo de material friccionante) saturados sometidos a la acción de un sismo, que destruye la presión efectiva del suelo convirtiéndolo en un fluido a manera de arena movediza. En la licuación o licuefacción la presión neutra de la masa de suelo aumenta hasta igualar la presión total. Ocurrido esto la presión intergranular se hace nula, se pierde el

autosuporte del esqueleto sólido del suelo, los edificios cimentados se hunden y el depósito, de estar mal confinado, fluye.

A causa de la excitación del sismo, por la turbulencia en el fluido, se genera una infiltración de los granos de arena que destruye la cohesión entre las partículas del suelo. Al desaparecer la presión intergranular, queda la arena sin ninguna resistencia al corte.

16.5 LA SITUACION EN COLOMBIA

En Colombia predominan **rocas blandas**, es decir, materiales intermedios entre suelos y rocas. Por ejemplo, las rocas de bajo o medio metamorfismo como esquistos, filitas, algunas serpentinitas y anfibolitas, e incluso algunos gneises y rocas mal consolidadas y mal cementadas, como margas, lodolitas, limolitas y areniscas blandas.

Las rocas blandas son susceptibles a los cambios de humedad típicos del ambiente tropical. Para la zona andina en el oriente de Colombia predominan espesos coluviones y en el occidente suelos residuales y volcánicos. El occidente está afectado por tectonismo y sismos.

Es importante para el ambiente andino tropical considerar los **suelos residuales** con sus estructuras relictas o heredadas, que a diferencia de los suelos transportados, donde las discontinuidades son horizontales (predecibles), estas resultan con orientación aleatoria y buzamiento impredecible.

Los espesores de las alteritas son mayores en las zonas tropicales (vegetación y clima), como la cordillera Oriental de naturaleza sedimentaria. Los saprolitos son típicos de la zona andina (roca cristalina), como las zonas de batolitos a lo largo de la cordillera Central y Antioquia. Los andosoles se desarrollan en lugares con cenizas volcánicas donde se desarrollan haloisitas y alófanos (Cauca, Nariño y zona

cafetera). Las lateritas son suelos típicos del Cauca y los Llanos Orientales.

Además de un **clima** con contrastes de temperatura y precipitación, existen **factores tectónicos**.

La precipitación es alta en Chocó y el margen llanero, moderada en la zona cafetera y baja en las zonas desérticas de Colombia (Guajira, Alto Magdalena, Villa de Leiva).

Colombia en su zona andina, tiene fallas, muchas activas, mostrándose en sus laderas inestables zonas con intenso fracturamiento donde los materiales presentan trituración y brechamiento. El occidente está afectado por las fallas de Romeral y Palestina (rumbo) y el oriente por el sistema de las fallas frontales de los Llanos (inversa). Ambas son de alto riesgo sísmico.

La falla geológica condiciona el drenaje interno y tras todo ello se presenta una cronoestratigrafía en repetidas ocasiones desfavorable puesto que en los estratos de diferentes edades se presentan contrastes de permeabilidad, zonas débiles, etc.

16.5.1 Zonificación. Si se integran en una zona cualquiera de Colombia, aunque sea a nivel regional, un mapa geológico, un mapa tectónico y un cuadro de movimientos masales clasificados, se pueden inferir algunos factores de inestabilidad (inherentes, detonantes, etc.). Si superponemos relieve y sobrefracturamiento obtenemos zonas más o menos propensas a deslizamientos. En Colombia las áreas de influencia del sistema Romeral y de las fallas del margen llanero se pondrían en evidencia como zonas altamente inestables.

Montero señala en Colombia varias provincias con amenaza alta a deslizamiento así:

- **Entre la falla Romeral y el Cauca.** Con rocas metamórficas, rocas con cataclasis y arcillas alófanas remoldeadas.
- **La cordillera Oriental.** Con suelos espesos (alteritas) sobre lutitas que son químicamente alterables.
- **El margen llanero.** Muy afectado por el ambiente tectónico y la naturaleza sedimentaria de los suelos.
- **Zonas con potentes flujos alterados.** Como la Estampilla (Manizales), donde se encuentran depósitos fluviotorrenciales alterados y en procesos de movimientos masales.
- **Zonas de coluviones.** Como los de Quebrada Blanca en la vía al Llano.
- **Saprolitos.** En zonas de debilidad tectónica.

En resumen la juventud de las cordilleras, el ambiente tectónico intenso y la naturaleza del clima, son factores que se conjugan para explicar la inestabilidad de nuestras laderas.

16.6 EVALUACION DEL RIESGO

Se denomina **amenaza** al evento o fenómeno perjudicial con un cierto nivel de magnitud o alcance, que tiene una probabilidad de ocurrencia significativa en un período de tiempo dado.

La **vulnerabilidad** es la susceptibilidad al daño de un elemento ante la ocurrencia de un fenómeno.

El **riesgo** es la posibilidad de afectar significativamente las vidas o bienes a causa de un fenómeno dañino que tiene una probabilidad determinada de ocurrir dentro de un período

de tiempo dado. La relación entre amenaza y riesgo se establece por medio de la expresión.

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} \times \text{Vulnerabilidad}$$

La amenaza depende del evento detonante, del grado de susceptibilidad a la falla y de la energía potencial destructiva del evento. La vulnerabilidad es directamente proporcional al grado de exposición de los elementos e inversamente proporcional a su resistencia al evento.

En consecuencia, sustituyendo los factores de amenaza y vulnerabilidad en la ecuación anterior podemos escribir:

$$\text{Riesgo} = \text{Detonante} \times \text{Susceptibilidad} \times \text{Potencial} \times \frac{\text{Exposición}}{\text{Resistencia}}$$

16.6.1 Factores de amenaza y factores de riesgo. Los factores de **amenaza** de conformidad con lo anterior son:

- La susceptibilidad debida a factores internos.
- Los eventos detonantes como lluvias, sismos, erosión y sobrecargas.
- El potencial de energía destructiva del sistema.

Y los factores de **riesgo** son:

- El nivel de amenaza.
- El grado de exposición de elementos que puedan sufrir daños posibles (ubicados sobre la ladera o al alcance del evento).
- La resistencia al fenómeno que opongan los elementos amenazados, para no sufrir daños estructurales ni funcionales.

Es importante señalar que los elementos considerados pueden ser vidas o bienes y que los eventos que generan la amenaza son el movimiento de masa y los fenómenos que éste desencadene.

16.6.2 Medidas y tipos de riesgo. Las medidas que se pueden tomar en casos de movimientos de masas pueden ser de tipo preventivo o correctivo. Los **riesgos** asociados a los movimientos de masas pueden denominarse:

- Riesgos evitables, según su origen sea evitable o sus consecuencias anulables.
- Riesgos controlables, según se trate de un evento predecible o un evento cuyos efectos sean atenuables.
- Riesgo incontrolable cuando no se puede predecir o evaluar completamente el riesgo, ni existen soluciones al alcance de la tecnología.
- Riesgos aceptables, cuando se marca una diferencia entre el mayor nivel de riesgo y la máxima previsión.

Las **medidas** aplicables pueden ser:

- Sistemas de observación y alarmas.
- Reducción de la exposición.
- Reducción de la amenaza.
- Incremento de la resistencia.
- Jerarquización de prioridades.
- Jerarquización de estudios.

16.6.3 Estudio económico del riesgo. La ingeniería es un compromiso entre tres cosas: seguridad, economía e

información. Con buena información sin sacrificar la seguridad, se puede obtener economía en los diseños. Para obtener información se deben invertir recursos (muestreos y ensayos), pues sin ésta no se podrán hacer análisis y se caerá en la improvisación, fuente de los altos costos o de la inseguridad.

A continuación se relacionarán algunos elementos para el estudio económico del riesgo.

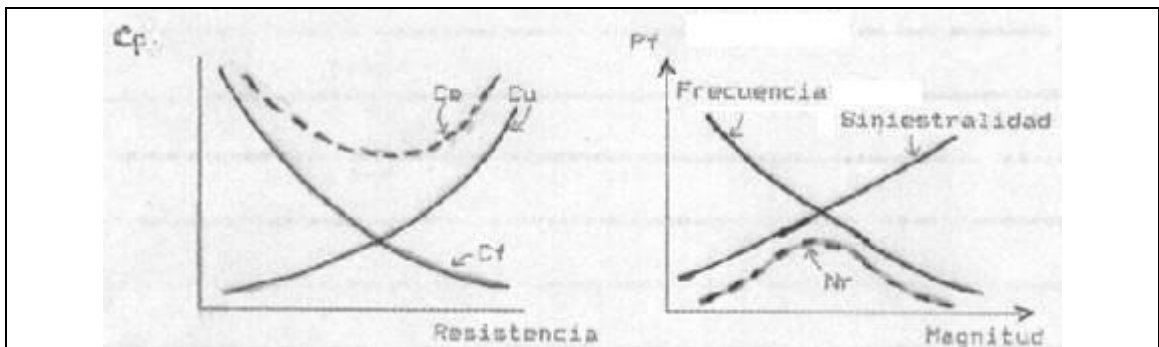


Figura 106, Evaluación del riesgo sísmico. Gráficas de Costo probable (CP) vrs. Resistencia (izquierda) y de probabilidad de falla (Pf) vrs. Magnitud del evento (derecha): los Costos esperados (Ce) son la suma de las funciones Csto usual (Cu) y Costo de falla (Cf). El nivel de riesgos (Nr) es el producto de las funciones de Siniestralidad y Frecuencia del evento. Según Alvaro J. González, curso de Estabilidad de Taludes, 1997.

- **El costo.** El estudio de costos de una estructura involucra el concepto de resistencia. El costo usual, que aumenta con la resistencia que se le quiere dar a la estructura es una función directamente proporcional, mientras el costo por falla, dado el evento, es inversamente proporcional a la resistencia de la estructura.

El costo finalmente resultará siendo el de construir la estructura con una resistencia dada, más el de repararla después del evento. Se observa en la gráfica que el nivel adecuado de resistencia es el mínimo de la función denominada Costo esperado (Ce), que no coincide con el

máximo ni con el mínimo de resistencia factible en la estructura.

- **Nivel de riesgo.** De otro lado, se pueden relacionar la probabilidad de falla de una estructura afectada por un evento de magnitud dada y la probabilidad de ocurrencia de dicho evento. Los eventos de gran magnitud son poco probables por lo que su probabilidad de ocurrencia es una función inversamente proporcional. De otro lado, la probabilidad de daño por un evento aumenta con su magnitud por lo que la función de probabilidad resulta en éste caso directamente proporcional.

Como la ocurrencia del evento y del daño, son simultáneos, las probabilidades han de multiplicarse entre sí. El nivel de riesgo es máximo para una magnitud intermedia, y ese define la amenaza con la cual se deben diseñar los planes de mitigación del riesgo.