

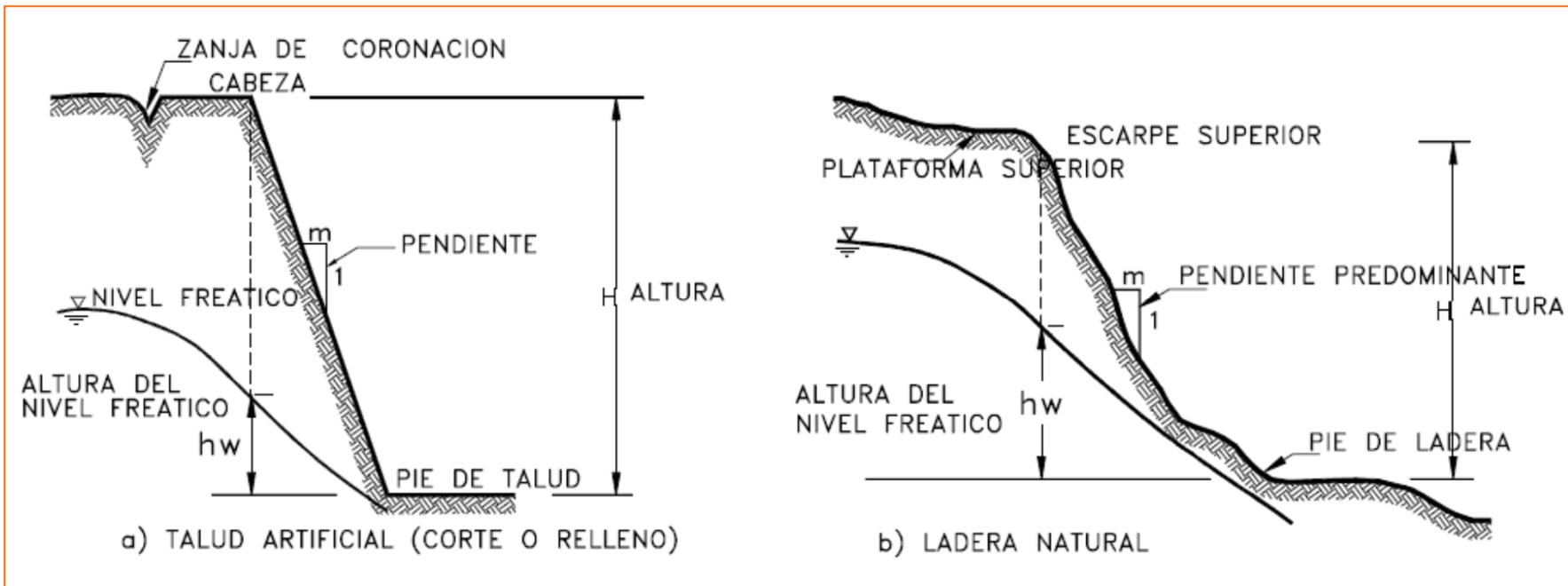


3. Estabilidad de Taludes

4.1.) Introducción

1

- Un talud (conformado artificialmente) o ladera (originado por un proceso natural) es una masa de tierra que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativos
- Los taludes se pueden agrupar en;
 - Terraplenes
 - Cortes de laderas naturales
 - Muros de contención



4.1.) Introducción

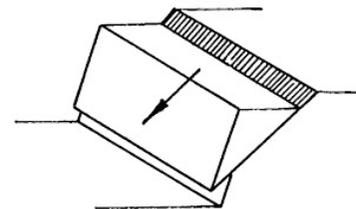
- Los movimientos de ladera son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los seres humanos, provocando miles de muertes y daños materiales al año
- Mayoritariamente son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención o control
- El agua es, en más del 70% de los casos, el principal responsable de los movimientos. Por ello es fundamental conocer el estado hidráulico del suelo, así como la pluviometría y épocas de deshielo.



Deslizamiento de ladera en el Salvador, Santa Tecla, en 2001.

4.1.) Introducción

Deslizamiento de tierras Highway 3, en Taiwán 2010

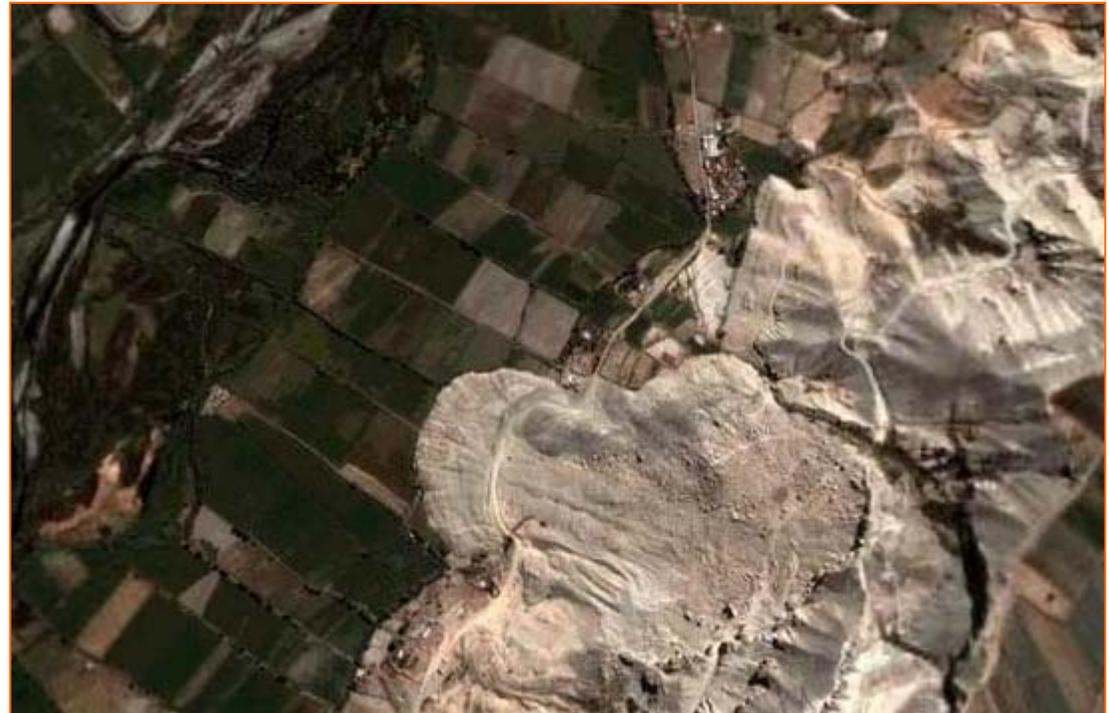


4.1.) Introducción

Vista desde la cabeza, deslizamiento Pie de Cuesta



Vista aérea deslizamiento Pie de Cuesta en Arequipa (Perú)



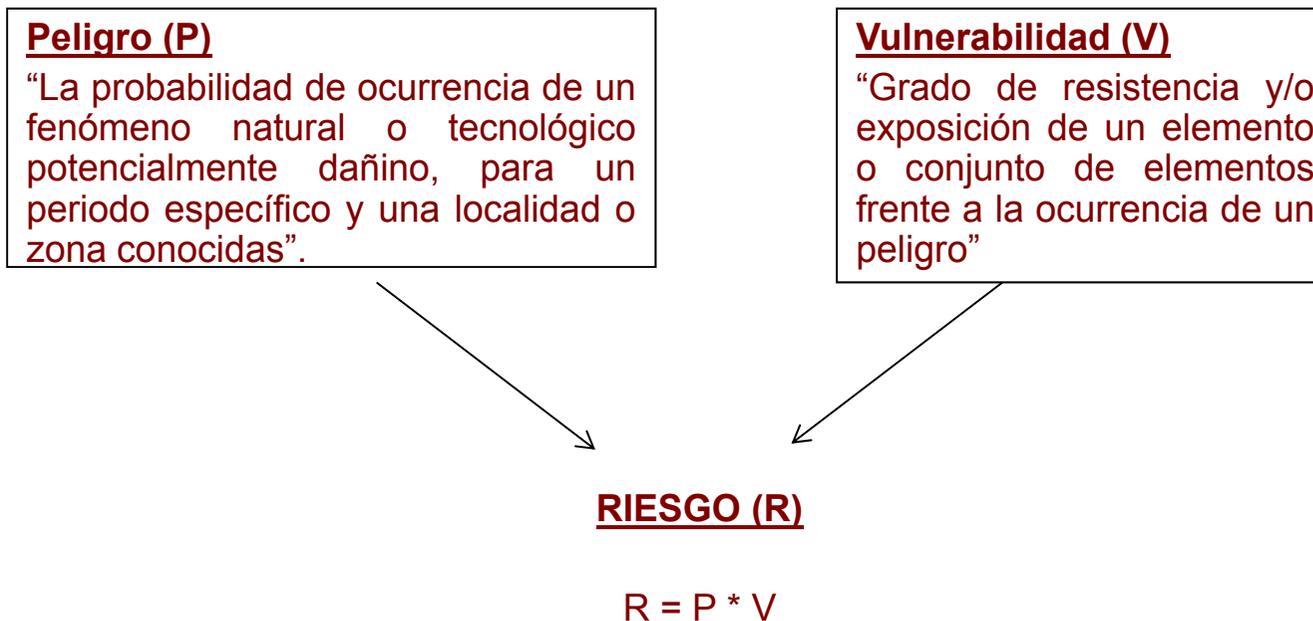
Vista desde el pie, deslizamiento Pie de Cuesta



4.1.) Introducción

3

Riesgo: “Es la estimación o evaluación matemática de probables pérdidas de vidas, de daños a los bienes materiales, a la propiedad y la economía, para un periodo específico y área conocidos, de un evento específico de emergencia. Se evalúa en función del peligro y la vulnerabilidad”



4.1.1.) Impacto de los desastres por movimientos de masa

•Desastres en pérdidas de vida estimados por año en todo el mundo; 600-1000 personas

AÑO	LOCALIZACIÓN	TIPO	Nº DE MUERTES
1786	Sichuan (CHINA)	Terremoto, muro deslizado	100.000
1933	Sichuan (CHINA)	Terremoto, muro deslizado	6.800
1963	Vaiont (ITALIA)	Deslizamiento en lago	2.000
1970	Huascarán (PERU)	Terremoto, avalancha	18.000
1999	Región central de la Costa Norte (VENEZUELA)	Inundaciones, deslizamientos y avalanchas	30.000 (fuente Cruz Roja Internacional)
2001	Colonia Las Colinas (EL SALVADOR)	Flujo de suelos y rocas (100.000 m3)	500

Fuente UNESCO

PAÍS	PÉRDIDAS ANUALES MILLONES U\$
JAPÓN	4.700
ITALIA	2.600
USA	1.800
INDIA	1.350
CHINA	500
ESPAÑA	220
CANADA	50
NUEVA ZELANDA	12

Fuente UNESCO

4.1.1.) Impacto de los desastres por movimientos de masa

- Los impactos provocados por un movimiento de masa son;
 - **Pérdidas de vidas y lesiones**
 - **Destrucción de bienes, infraestructuras y vías de comunicación** → y sus consecuentes costes económicos de reparación
 - **Pérdidas de terrenos productivos** → por la desaparición de éstos y/o el lavado de la capa vegetal
 - **Contaminación de aguas potables**
 - **Destrucción social**



4.1.2.) Factores que rigen la estabilidad

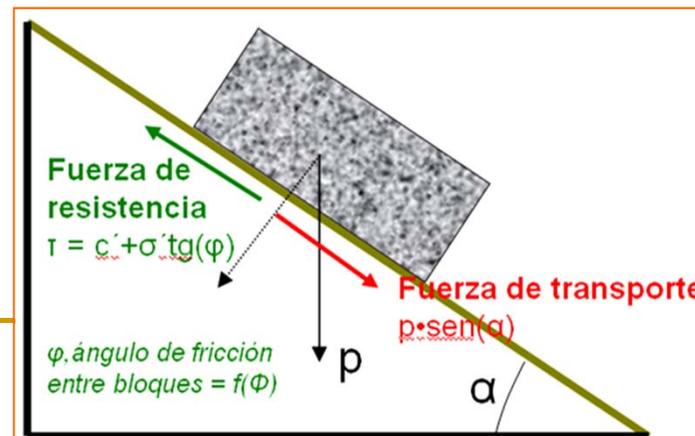
- El movimiento en masa ocurre cuando el terreno está inclinado más allá del ángulo de estabilidad umbral
- **Ángulo de reposo**; inclinación estable máxima de una pendiente, el ángulo al cual una pendiente puede mantenerse a sí misma
- A mayor ángulo del de reposo, la pendiente restaurará su estabilidad con una falla
- Si las fuerzas de transporte (**shear stress**) son mayores que las de resistencia del material (**shear strenght**) → **MOVIMIENTO DEL BLOQUE O DEL SUELO**
- La fuerza de resistencia depende de la cohesión del material y la fricción estática entre bloque y plano de deslizamiento

$$FS = \frac{\text{Fuerza de resistencia}}{\text{Fuerza de transporte}}$$

$$FS = \frac{\text{Resistencia al corte}}{\text{Esfuerzo al corte}}$$

- En superficies circulares, donde hay un centro de giro, momentos resistentes y actuantes;

$$FS = \frac{\text{Momento resistente}}{\text{Momento actuante}}$$



4.1.3.) Causas que motivan el movimiento

• Las causas que motivan el movimiento en masa pueden clasificarse dependiendo de la etapa del proceso de la falla en la que son determinantes;

–CONDICIONES ORIGINALES DEL TALUD
(SU SUSCEPTIBILIDAD INHERENTE AL DESLIZAMIENTO)

- Geológicas
- Morfológicas
- Parámetros hidrológicos e hidrogeológicos
- Parámetros ambientales
- Cobertura vegetal

–FACTORES DE DETERIORO
(MODIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES ORIGINALES, QUE INCREMENTAN SU SUSCEPTIBILIDAD)

–FACTORES DETONANTES
(PROVOCAN EL MOVIMIENTO EN MASA, EN MUCHAS OCASIONES SE SOLAPAN CON LOS FACTORES DE DETERIORO)

- Geológicas y morfológicas
- Físicas
- Antropológicas

Condiciones Originales del talud (I)

CONDICIONES ORIGINALES DEL TALUD

- Geológicas
- Morfológicas
- Parámetros hidrológicos e hidrogeológicos
- Parámetros ambientales
- Cobertura vegetal

•Geológicas

–Formación geológica

»Resistencia al cortante, dependiente de las características inherentes de los materiales;
 c' , Φ'

»Permeabilidad

»Sensibilidad (en algunas arcillas llega hasta 4) y expansividad (arcillas

»Erosionabilidad)

»Distinto comportamiento dependiendo del origen geológico de los materiales

–Discontinuidades

»Actúan como planos de debilidad o como conductores de corriente de agua subterránea

–Diferencia de rigideces entre materiales

–Buzamientos a favor de pendiente

–Fracturación

Condiciones Originales del talud (II)

•Morfológicas

–Pendiente

- » Los perfiles más profundos de meteorización se encuentran en los taludes suaves más que en los empinados
- » Según Skempton, teóricamente en suelos granulares limpios y secos, el ángulo de inclinación del talud con la horizontal no debe sobrepasar el del ángulo de rozamiento del material

–Curvatura

- » Afecta al equilibrio de la masa en sí
- » Capacidad de infiltración y erosión por su efecto en la velocidad del agua de escorrentía

–Largo, ancho

- » Cuanto más largo sea un talud, mayor recorrido tendrán las aguas de escorrentía sobre éste y por lo tanto el talud estará más expuesto a la erosión superficial

–Áreas de infiltración arriba del talud

- » Coinciden con depresiones topográficas o zonas de regadío intenso

•Parámetros hidrológicos e hidrogeológicos

–Pluviometría

–Cambios en el régimen de aguas subterráneas (determinar áreas de recarga y descarga)

•Parámetros ambientales

–Según Blight las reacciones químicas se duplican con cada 10°C de aumento de las temperaturas

•Cobertura vegetal

Factores de deterioro y detonantes (I)

–Geológicos y Morfológicos

- Meteorización
- Descomposición por desecación
- Reducción de la cohesión
- Lavado, disolución de los ligantes cementales
- Erosión interna
- Sifonamiento

–Físicos

- Sedimentación; Deposición de cargas a favor de deslizamiento
- Erosión; p.e. socavación de la base
- Desmoronamiento
- Sismicidad, vibraciones; producen fracturación, remoldeo, aumento de presión de poros, licuefacción de los suelos y la generación de fuerzas dinámicas sobre las masas de suelo
- Erupciones volcánicas; vibración+cambios de temperatura+aporte de materiales
- Modificación presión de poros; lluvias, variaciones del N.F., filtraciones, variaciones de cauces de ríos, inundaciones (por saturación del suelo + erosión)
- Oleaje; erosión, socavación
- Expansividad; Presión de tierras (p.e. arcillas expansivas) en cabeza de talud a favor de pendiente, de la vegetación (raíces, etc...) e incremento de volumen del agua en poros y fisuras por helada
- Deshielo rápido de las nieves
- Fisuración
- Deformación al cortante
- Tectónica

Factores de deterioro y detonantes (II)

–Antropológicos

- Meteorización
 - Incremento de la urbanización y asentamientos poblacionales en zonas de riesgo de deslizamientos
 - Excavaciones o cortes que modifiquen la topografía
 - Excavaciones subterráneas, las cuales afectan a la estructura y condiciones de esfuerzos del suelo encima de ellos
 - Rellenos o depósitos sobre el talud
 - Irrigación, fugas de servicios, mal mantenimiento de sistemas de drenaje (incremento presión de poros)
 - Deforestación de áreas de riesgo
 - Vibraciones inducidas (tráfico, construcciones aledañas)
 - Incremento de la pluviometría por cambio climático
-

Influencia en las fuerzas que gobiernan el movimiento

•A continuación se describen como afectan los distintos factores en las fuerzas que gobiernan los movimientos en masa;

–INCREMENTO EN EL STRESS DE CORTE (FUERZAS DE TRANSPORTE)

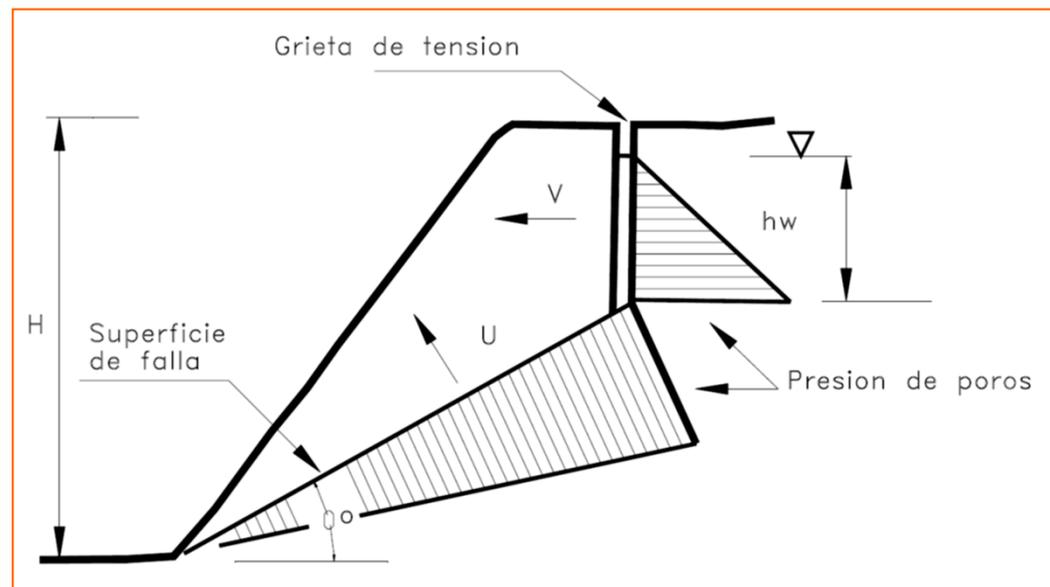
- Eliminación del soporte o base (socavación), debido a; erosión, deslizamientos previos, cortes de carreteras y canteras.
- Incremento de carga; incremento del peso del suelo por saturación, peso de nieve, rellenos...
- Incremento de presiones laterales (presiones hidráulicas, raíces, cristalización, expansión de la arcilla)
- Grietas de tracción (en suelos cohesivos)
- Stress transitorio (terremotos, vibraciones, explosiones)
- Movimientos geológicos

–DISMINUCIÓN EN LA RESISTENCIA DEL MATERIAL

- Meteorización
- Cambios en el estado de consistencia
- Variación de la presión intersticial que implique reducción de la tensión efectiva ($\sigma' = \sigma - u$) (disminución de la succión (presión intersticial negativa) o aumento de la positiva), reduciéndose la resistencia a cortante del material ($\tau = c + \sigma' \text{tg}\Phi$)
- Cambios en la estructura (disminución de la resistencia en el plano de falla –p.e. lubricación-, fracturación)

4.1.4.) Presión de poros y sus efectos

- Si no hay flujo de agua, la presión es la hidrostática y la medida del piezómetro coincide con el nivel freático
- Si hay flujo, la presión de poros en cualquier punto dentro de la masa de suelo puede medirse por medio de las redes de flujo. Las redes de flujo comprenden las líneas de flujo y las líneas de igual presión de poros
- En el caso de existir drenaje, la presión de poros disminuye hacia la superficie del talud, si este es deficiente se puede presentar un aumento importante de la presión en el pie del talud



Presión de poros sobre una superficie de falla potencial

Efectos en la estabilidad del agua subterránea (I)

•PRESIONES DE PORO

- Disminuye la presión efectiva → reducción de la resistencia al corte ($\tau=c'+\sigma'tg(\Phi')$)
- La presencia de fracturas permite la ocurrencia de presiones muy altas con muy poca filtración de agua

•DISMINUCIÓN O ELIMINACIÓN DE LAS PRESIONES DE PORO NEGATIVAS

- Al saturarse un suelo disminuyen las tensiones capilares (de succión), disminuyendo su tensión efectiva

•LAVADO DE MATERIAL DE CEMENTACIÓN

- El lavado de la matriz de cementación → reducción de la cohesión y el ángulo de rozamiento

•EROSIÓN INTERNA

- El movimiento de agua subterránea socava la arena fina y partículas sueltas

•EROSIÓN POR EXFILTRACIÓN

- El agua al aflorar produce fenómenos de erosión
-

Efectos en la estabilidad del agua subterránea (II)

•SUBPRESIONES

–El agua subterránea confinada actúa como subpresión sobre las capas permeables → disminución de resistencia al corte y ejerciendo presiones hidrostáticas horizontales en las juntas

•AUMENTO DE LA DENSIDAD

–Aumenta el peso de los materiales del suelo

•FUERZAS DINÁMICAS

–El movimiento de las corrientes de agua subterránea ejerce fuerzas sobre el suelo en la dirección del flujo → elemento desestabilizante en la masa del suelo

•GRIETAS POR DESECACIÓN

–Los fenómenos de agrietamiento determinan la extensión y ubicación de la superficie de falla

4.2.) Etapas en el proceso de falla

- Los movimientos en el proceso de falla de una ladera o talud pueden clasificarse en **cuatro etapas diferentes**;
 - a) **ETAPA DE DETERIORO**, antes de la falla el suelo está esencialmente intacto
 - b) **ETAPA DE FALLA**, caracterizada por la formación de una superficie de falla o el movimiento de una masa importante de material
 - c) **ESTAPA POST-FALLA**, que incluye los movimientos de la masa involucrada en un deslizamiento desde el momento de la falla y hasta el preciso instante en el cual se detiene totalmente
 - d) **ETAPA DE POSIBLE REACTIVACIÓN**, en la cual pueden ocurrir movimientos que pueden considerarse como una nueva falla, e incluye las tres etapas anteriores



Deslizamiento ladera izquierda en el embalse de Yesa (Navarra)

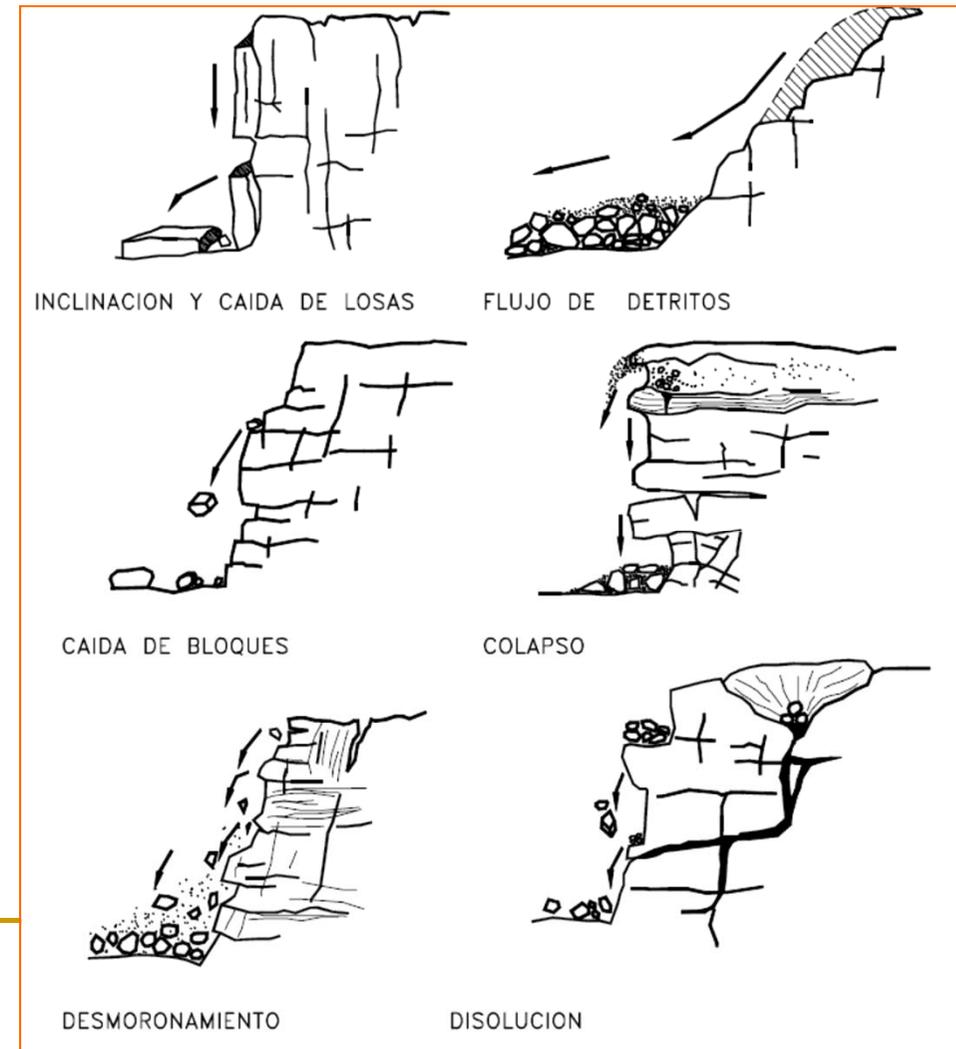
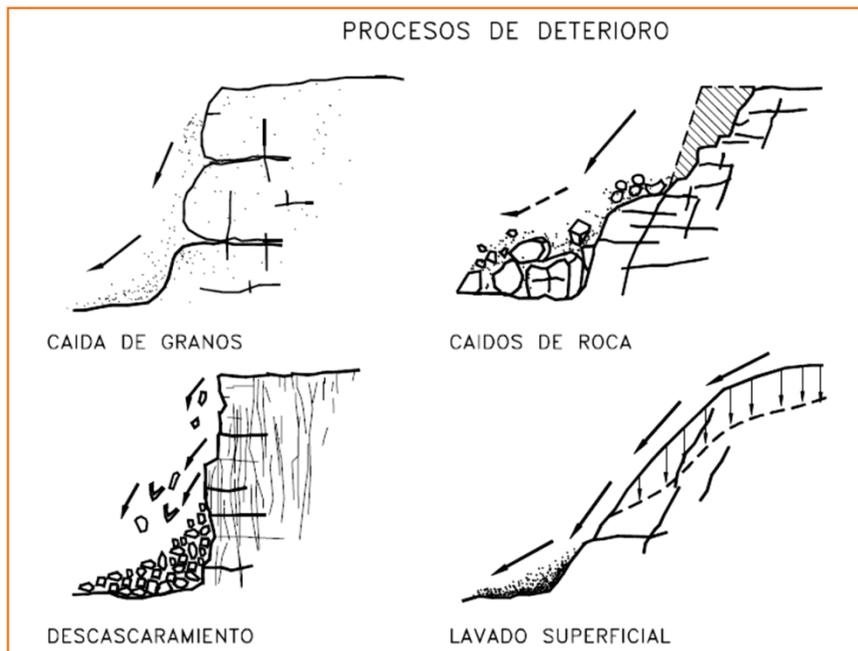


Cortenova, Lombardia,
Italia (2002)



4.2.1.) Procesos en la etapa de deterioro

- El deterioro comprende la alteración física y química de los materiales y su subsecuente desprendimiento o remoción
- La iniciación y propagación de fracturas es una muestra significativa de la destrucción de la superficie, que puede conducir a desprendimientos o al colapso del talud
- La clasificación de los modos comunes de deterioro fue propuesta por Nicholson y Hencher (1997);



4.2.1.) Procesos en la etapa de deterioro

PROCESO DE DETERIORO	DEFINICIÓN	GRAVEDAD/ CONSECUENCIAS	SOLUCIONES
CAIDA DE GRANOS	<ul style="list-style-type: none"> •Caída de granos individuales de la masa de roca debido a la desintegración física 	<ul style="list-style-type: none"> •Causa un debilitamiento general de la roca •No representa amenaza en si misma pero puede conducir a la pérdida de soporte y el consecuente colapso •Los finos pueden sedimentarse y producir depósitos dentro de las estructuras de drenaje 	<ul style="list-style-type: none"> •Limpieza de los residuos al pie del talud •En las áreas de riesgo de colapso; Cubrición con técnicas de bioingeniería, gunita y refuerzo local (restauración geológica)
DESCASCARAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> •Caída de cáscaras de material de la masa de roca •Reflejo de la litología o la penetración de la meteorización 	<ul style="list-style-type: none"> •El tamaño de las láminas no son grandes y no constituyen una amenaza 	<ul style="list-style-type: none"> •Tratamiento mediante boingeniería, gunita con anclajes (cosido de bloques) y sellado de juntas
INCLINACIÓN Y CAIDA DE LOSAS	<ul style="list-style-type: none"> •Prismas o placas de dimensión mínima 50mm 	<ul style="list-style-type: none"> •Pueden caer grandes bloques, causando graves daños a infraestructuras y a los canales de drenaje 	<ul style="list-style-type: none"> •Construcción de bermas intermedias •Refuerzo con mallas y estructuras de contención
CAÍDOS DE BLOQUES	<ul style="list-style-type: none"> •Pueden caer por gravedad •Bloques de cualquier tamaño 	<ul style="list-style-type: none"> •La amenaza es difícil de predecir por la variación del rango del tamaño de bloques, pudiendo llegar a ser grave 	<ul style="list-style-type: none"> •Construcción de bermas intermedias, mallas de protección y gunita

4.2.1.) Procesos en la etapa de deterioro

PROCESO DE DETERIORO	DEFINICIÓN	GRAVEDAD/ CONSECUENCIAS	SOLUCIONES
DESMORONAMIENTO DEL TALUD	<ul style="list-style-type: none"> •Produce la caída de bloques de diversas dimensiones en forma semicontinua 	<ul style="list-style-type: none"> •Puede causar una amenaza significativa 	<ul style="list-style-type: none"> •Construcción de bermas, colocación de mallas, gunitado •Estructuras de contención (muros de gaviones) •Cosido de grandes bloques (anclajes, bulones) •Reducir en áreas de afección severa el ángulo de inclinación
CAÍDOS DE ROCA	<ul style="list-style-type: none"> •Caída de gran cantidad de bloques “en un solo evento” •El volumen de la falla depende de los diversos planos de discontinuidad 	<ul style="list-style-type: none"> •Afecciones importantes a infraestructuras y a las redes de drenaje 	<ul style="list-style-type: none"> •Mallas de triple torsión, soil nailing (gunita + anclajes + drenaje) •Estructuras de contención •Generación de pasillos de protección al pie del talud
LAVADO SUPERFICIAL O EROSIÓN	<ul style="list-style-type: none"> •El flujo de la escorrentía puede concretarse en canales produciendo surcos y cárcavas o tener un efecto más general (lavado) •Se produce sedimentación al pie del talud 	<ul style="list-style-type: none"> •Depende del volumen de la erosión, pudiendo llegar a ser muy graves (los debidos a grandes escorrentías) 	<ul style="list-style-type: none"> •Construcción de obras de drenaje •Gunita •Modificación de la morfología del talud •Sellado de fisuras

4.2.1.) Procesos en la etapa de deterioro

PROCESO DE DETERIORO	DEFINICIÓN	GRAVEDAD/ CONSECUENCIAS	SOLUCIONES
FLUJO DE DETRITOS	<ul style="list-style-type: none"> •El desprendimiento y transporte de partículas gruesas y finas en una matriz de agua y granos en forma de flujo seco y saturado •Se les suele considerar como deslizamiento en vez de procesos de deterioro 	<ul style="list-style-type: none"> •Son impredecible, mueven grandes volúmenes de material y pueden crear una amenaza moderada a alta 	<ul style="list-style-type: none"> •Análisis específico para cada caso
COLAPSO	<ul style="list-style-type: none"> •Bloques independientes de gran tamaño colapsan debido a la falta de soporte vertical •Tamaño de bloques >500mm y taludes negativos 	<ul style="list-style-type: none"> •Gran amenaza 	<ul style="list-style-type: none"> •Estructuras de contención •Restauración geológica (consolidación, cosido de fisuras y microfisuras, bulones) •Malla, gunitado
DISOLUCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> •La disolución de materiales solubles en agua •Puede ser acelerado por la presencia de aguas agresivas •Pueden provocar cavidades internas (Karsticas) 	<ul style="list-style-type: none"> •Depende del volumen de la erosión, pudiendo llegar a ser muy graves (los debidos a grandes escorrentías) 	<ul style="list-style-type: none"> •Inyección y relleno de cavidades •Construcción de estructuras de puente

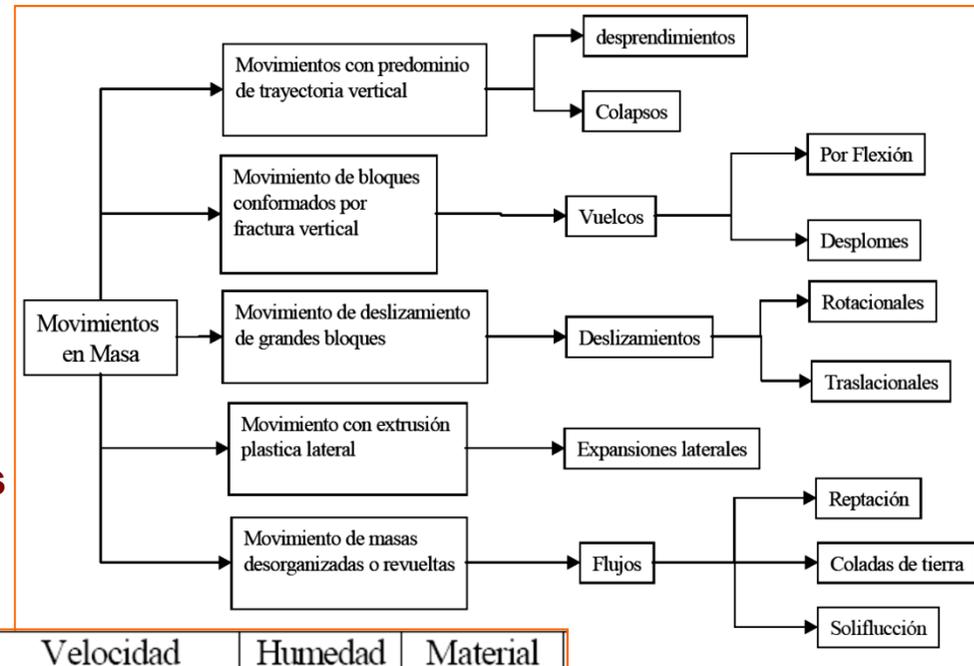
4.2.1.) Procesos en la etapa de deterioro

PROCESO DE DETERIORO	DEFINICIÓN	GRAVEDAD/ CONSECUENCIAS	SOLUCIONES
EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> •En suelos arcillosos (expansividad y retracción ante variación de su grado de humedad), se da pérdida de resistencia al cortante 	<ul style="list-style-type: none"> •Depende cada caso y tamaño de talud 	<ul style="list-style-type: none"> •Evitar variación del grado de humedad •Estabilización del suelo (adicionando cal)
AGRIETAMIENTO COSÍSMICO	<ul style="list-style-type: none"> •Debido a la sismos se producen agrietamientos en materiales rígidos y frágiles, debilitando la masa de talud y favoreciendo superficies de falla 	<ul style="list-style-type: none"> •Depende del volumen de masa del deslizamiento que se puede ocasionar 	<ul style="list-style-type: none"> •Refuerzo subsuperficial con raíces de cobertura vegetal superficial (crean una malla natural)
DEFORMACIONES POR CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y FATIGA	<ul style="list-style-type: none"> •Por fatiga de los materiales del suelo o roca 		<ul style="list-style-type: none"> •Reduciendo los esfuerzos tensionales a los que está sometido el suelo o la roca, construyendo estructuras de contención o refuerzo
AGRIETAMIENTO POR TENSIÓN	<ul style="list-style-type: none"> •Los suelos poseen muy baja resistencia a la tracción (fundamentalmente en la cabeza de los taludes), produciéndose grietas de tensión •Las grietas facilitan la infiltración de agua y debilitan la estructura de la masa de suelo, formándose superficies de falla 		<ul style="list-style-type: none"> •Reducción de tensión mediante la construcción de estructuras de contención o refuerzo (soil-nailing, bulones) •Cosido y sellado de fisuras

4.2.2.) Clasificación de los movimientos en masa

• En muchas ocasiones es difícil identificar cuando son procesos de deterioros previos o son componentes principales del movimiento del talud

• La clasificación de los movimientos más generalizada es la de Varnes (1978), actualizada por Cruden & Varnes (1996);



Tipos de movimientos en masa

Tipo	Secuencia	Estado de actividad	Estilo	Velocidad	Humedad	Material
Caído	Progresivo	Activo	Complejo	Extremadamente	Seco	Roca
Inclinación	Retrogresivo	Reactivado	Compuesto	rápido	Húmedo	Tierra
Deslizamiento	Ampliándose	Suspendido	Múltiple	Muy rápido	Mojado	Residuos
Esparcimiento	Alargándose	Inactivo	Sucesivo	Rápido	Muy	
Flujo	Confinado	Dormido	Sencillo	Moderado	Mojado	
	Disminuyendo	Abandonado		Lento		
	Moviéndose	Estabilizado		Muy lento		
		Relicto		Extremadamente lento		

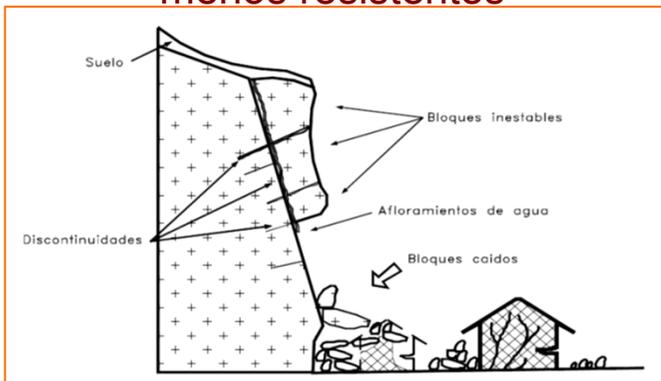
4.2.2.1.) Tipos de movimientos en masa (Cruden&Varnes)

•La clasificación de los tipos de movimientos en masa definida por Cruden&Varnes (1978);

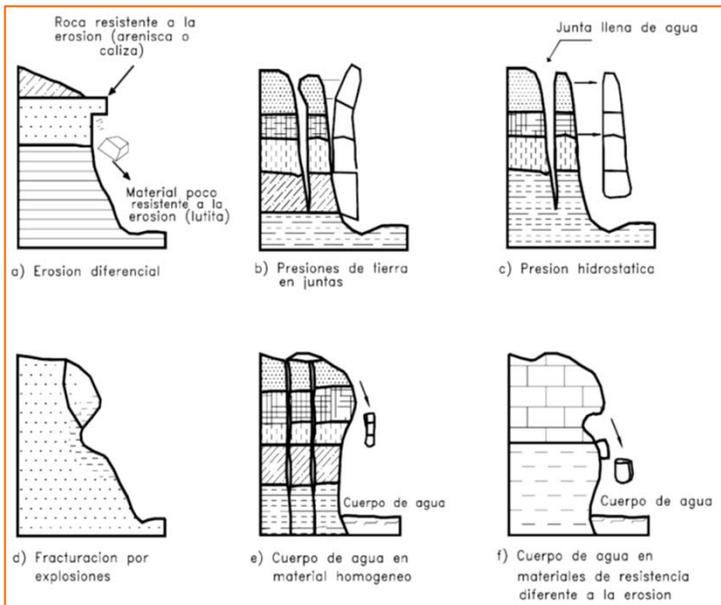
- CAÍDOS
- INCLINACIÓN O VOLTEO
- REPTACIÓN
- DESLIZAMIENTO
 - DESLIZAMIENTO ROTACIONAL
 - DESLIZAMIENTO DE TRASLACIÓN
- EXTENSIÓN LATERAL (LATERAL SPREAD)
- FLUJO
 - FLUJO EN ROCA
 - FLUJO DE RESIDUOS (DETRITOS)
 - FLUJO DE SUELO
 - FLUJOS DE LODOS
- AVALANCHA
- MOVIMIENTOS COMPLEJOS

4.2.2.1.1.) Caídos

- Una masa de cualquier tamaño se desprende del talud
- Típico en series rocosas sedimentarias subhorizontales de estratos alternantes más y menos resistentes

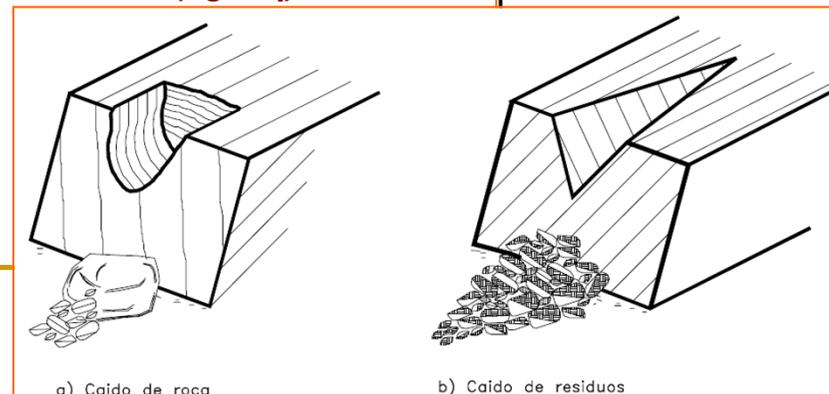
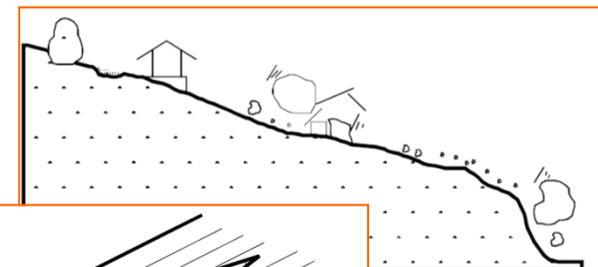


- Desciende principalmente; a través del aire por caída libre (**pendiente superficial superior a 75°**), o a saltos o rodando (**taludes inclinación menor a 45°**)
- El movimiento es de muy rápido a extremadamente rápido
- Causas; la lluvia, meteorización de la roca, hinchamiento agua en fracturas, escorrentía, viento, buzamientos a favor de talud, nacimientos de agua, vibraciones, acción del hombre, etc...



Caídos de bloques por gravedad en roca fracturada (fig. sup)

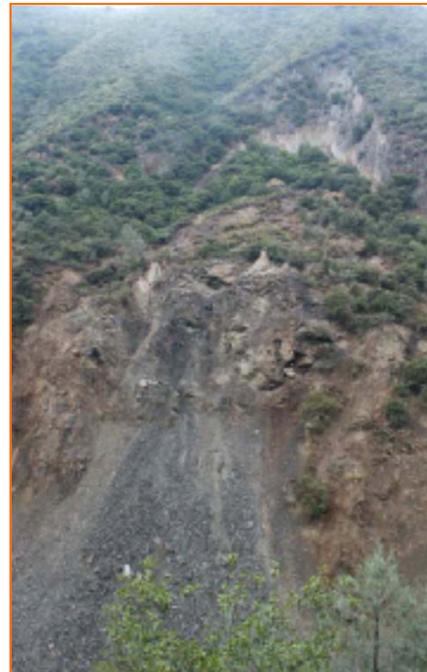
Algunos mecanismos de falla de caídos (fig. izq)



Caídos de bloques rodando

Esquema de caídos de roca y residuos

4.2.2.1.1.) Clasificación de los movimientos en masa / Caídos



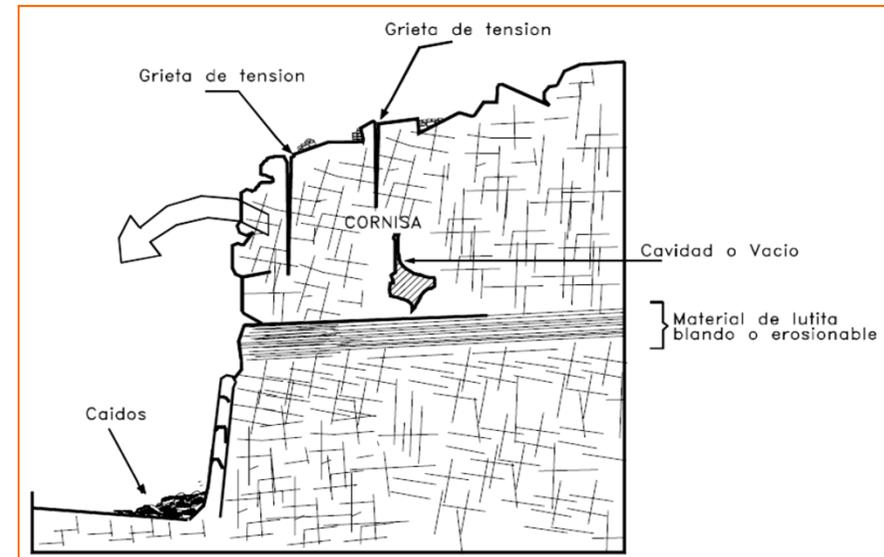
4.2.2.1.1.) Clasificación de los movimientos en masa / Caídos

Caída del wall arch el 4/08/08 en el Parque Nacional de Arches (Utah)

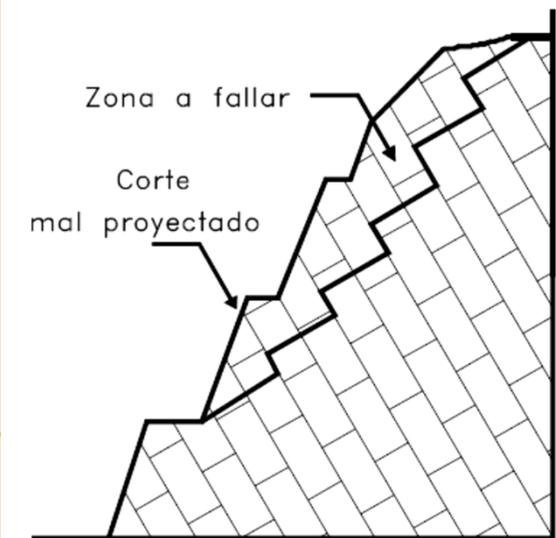


4.2.2.1.2.) Inclinación o volteo

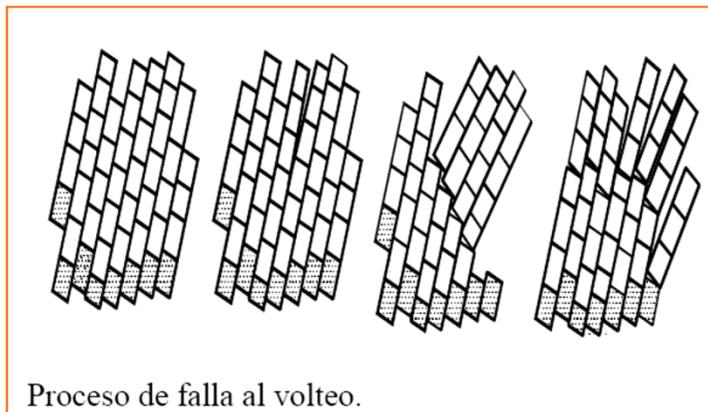
- Rotación hacia delante de una unidad o unidades de material térreo con centro de giro por debajo del centro de gravedad de la unidad
- Ocurre generalmente en formaciones rocosas
- Lo producen fuerzas generadas por las unidades adyacentes; el agua en las grietas, expansiones y los movimientos sísmicos
- Puede abarcar desde zonas pequeñas a grandes volúmenes (millones de m³)
- Pueden variar de extremadamente lentas a extremadamente rápidas.
- Las características de la estructura de la formación geológica determinan la forma de ocurrencia



**Volteo de
materiales
residuales**



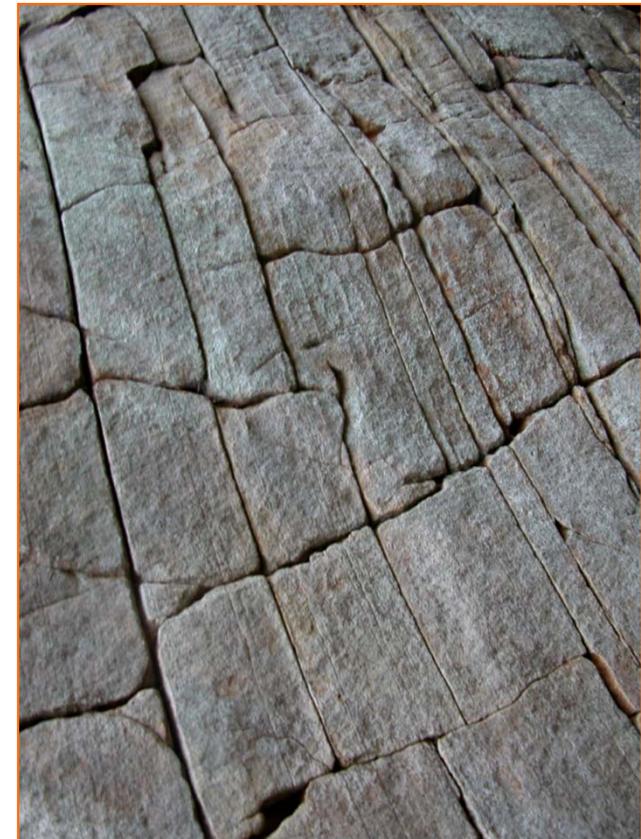
**El volteo puede generar
falla en escalera**



4.2.2.1.2.) Clasificación de los movimientos en masa / Inclinación o volteo



Falla en escalera

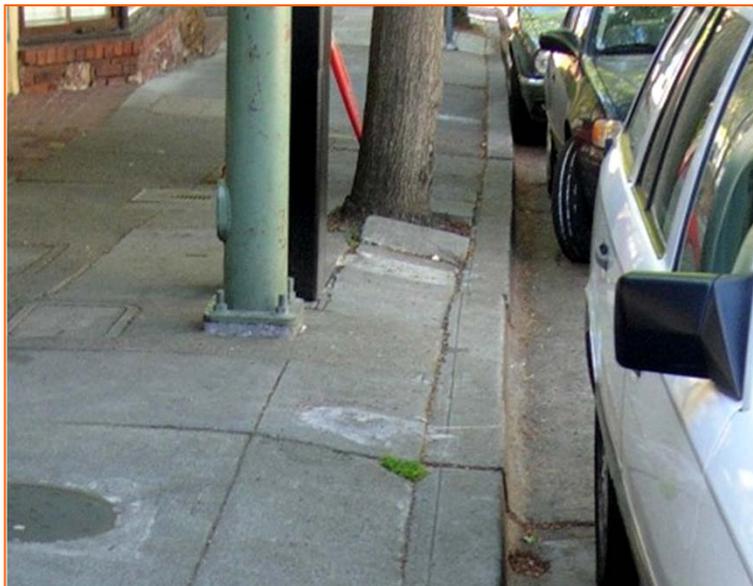


Proceso de falla al volteo

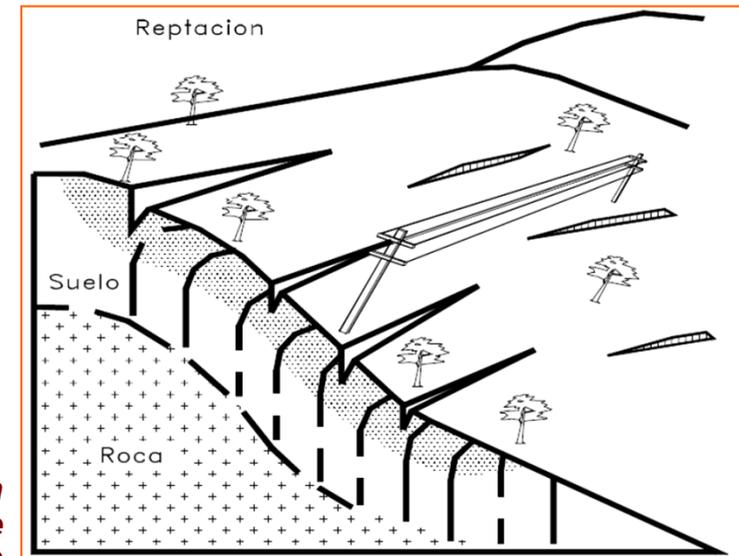


4.2.2.1.3.) Reptación

- Movimientos muy lentos a extremadamente lentos del suelo subsuperficial sin una superficie de falla definida
- Generalmente, el movimiento es de unos pocos centímetros al año y afecta a grandes áreas de terreno
- Se le atribuye a alteraciones climáticas relacionadas con los procesos de humedecimiento y secado en suelos, usualmente, muy blandos o alterados
- La reptación puede preceder a movimientos más rápidos como los flujos o deslizamientos

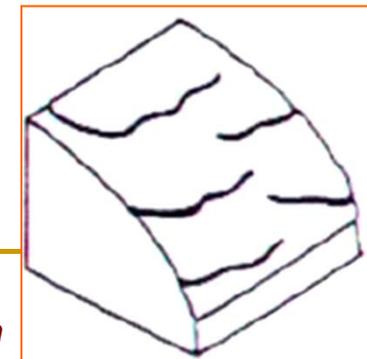


Efectos “visibles” de fenómeno de reptación



Esquema de un proceso de reptación

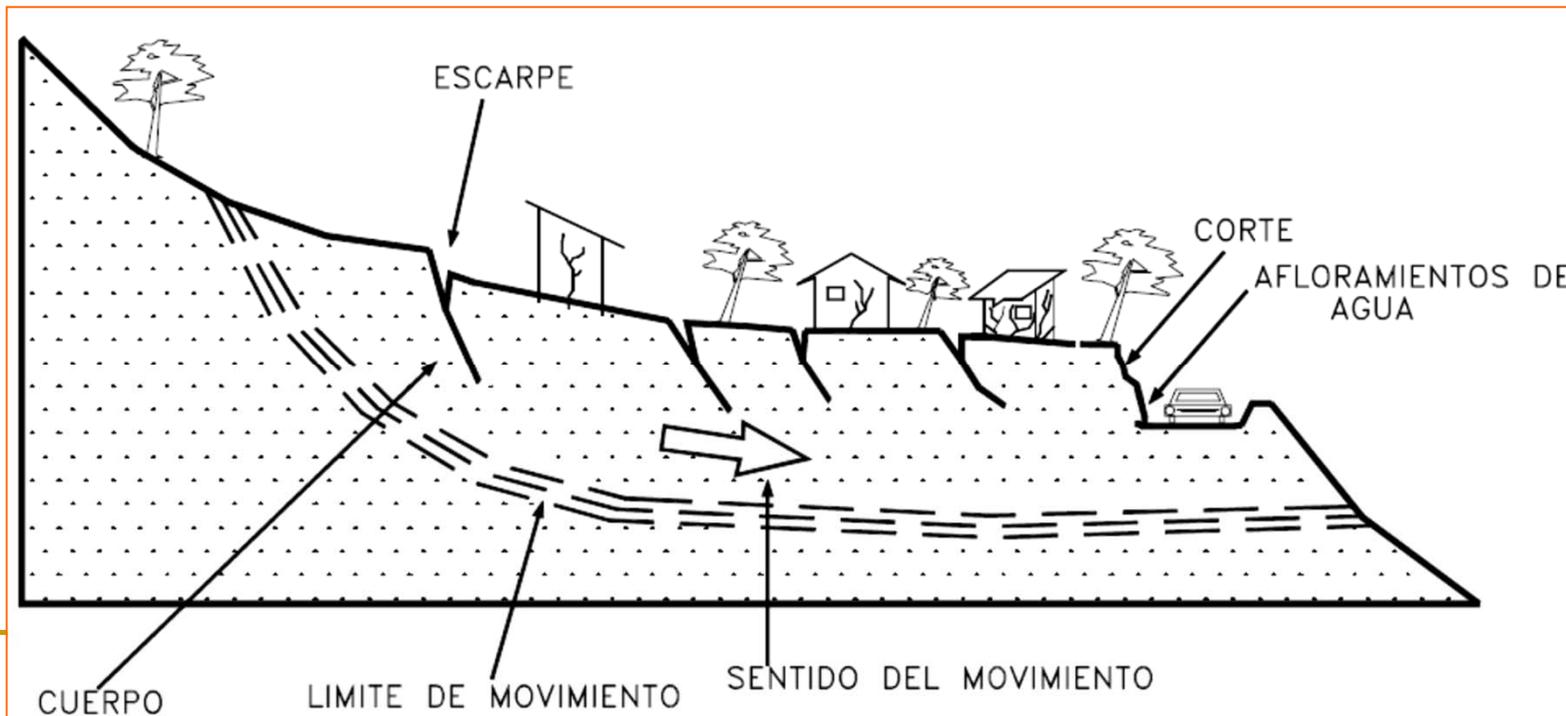
• **SOLIFLUCCIÓN**; Es una deformación en pequeñas dimensiones en suelos cohesivos y de poco espesor, que dan lugar a formas lobuladas.



Soliflucción

4.2.2.1.4.) Deslizamiento

- Es un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies
- El movimiento puede ser progresivo; que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda, la que sería, la superficie de falla
- Los deslizamientos pueden ser de una sola masa que se mueve o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes
- Pueden obedecer a procesos naturales o a desestabilización de masas de tierra por el efecto de cortes, rellenos, deforestación, etc..



Deslizamientos en suelos blandos

4.2.2.1.4.) Deslizamiento / Dimensiones del movimiento

- Se utiliza la terminología recomendada por el IAEG;

1. Ancho de la masa desplazada W_d

Ancho máximo de la masa desplazada perpendicularmente a la longitud, L_d .

2. Ancho de la superficie de falla W_r

Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicularmente a la longitud L_r .

3. Longitud de la masa desplazada L_d

Distancia mínima entre la punta y la cabeza.

4. Longitud de la superficie de falla L_r

Distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.

5. Profundidad de la masa desplazada D_d

Máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por W_d y L_d

6. Profundidad de la superficie de falla D_r

Máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por W_r y L_r .

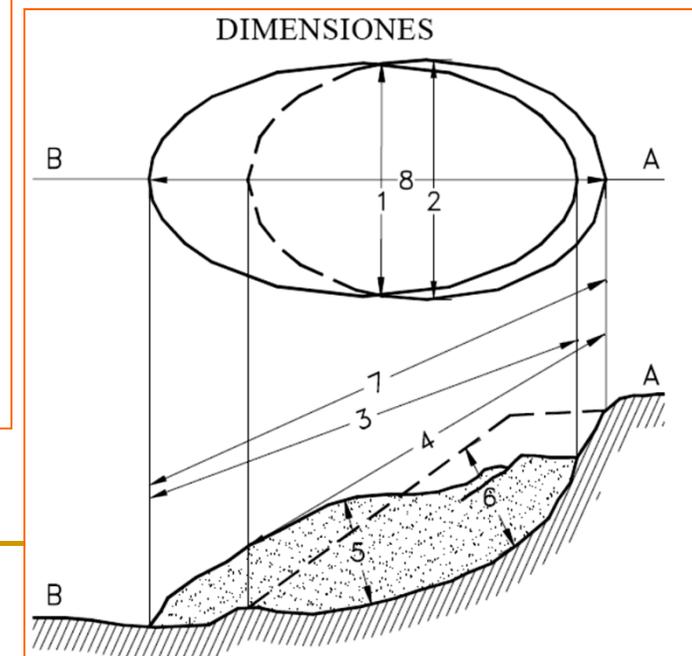
7. Longitud total L

Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.

8. Longitud de la línea central L_{cl}

Distancia desde la punta o uña hasta la corona del deslizamiento a lo largo de puntos sobre la superficie original equidistantes de los bordes laterales o flancos.

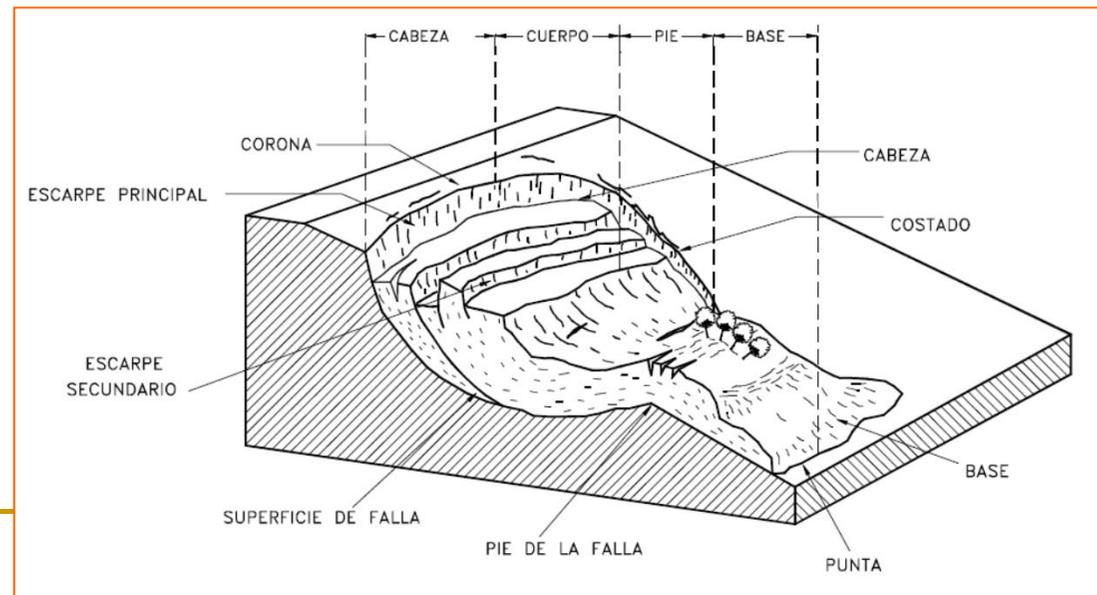
- El volumen de material medido antes del deslizamiento generalmente aumenta con el movimiento, describiéndose éste por el término “Factor de expansión”



4.2.2.1.4.1.) Deslizamiento rotacional

- La superficie de falla es formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento
- Suelen ocurrir en suelos homogéneos, sean naturales o artificiales.
- En planta, el deslizamiento posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento
- El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento, generándose comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento
- Generalmente el escarpe debajo de la corona tiende a ser semivertical, lo cual facilita la ocurrencia de movimientos retrogresivos

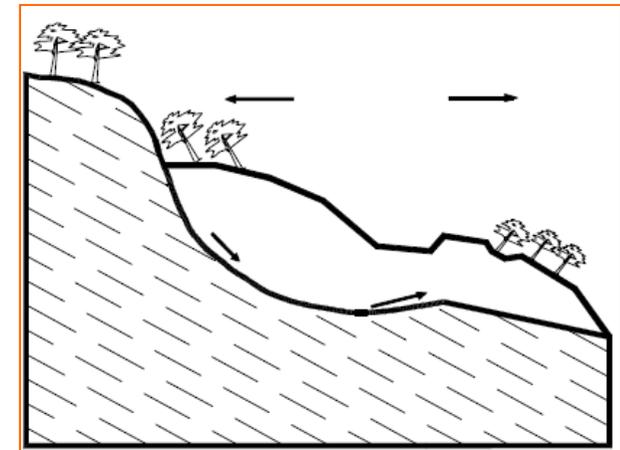
- Dentro del deslizamiento, ocurren otros desplazamientos curvos que forman escarpes secundarios y ocasionalmente ocurren varios deslizamientos sucesivos en su origen pero que conforman una zona de deslizamientos rotacionales independientes



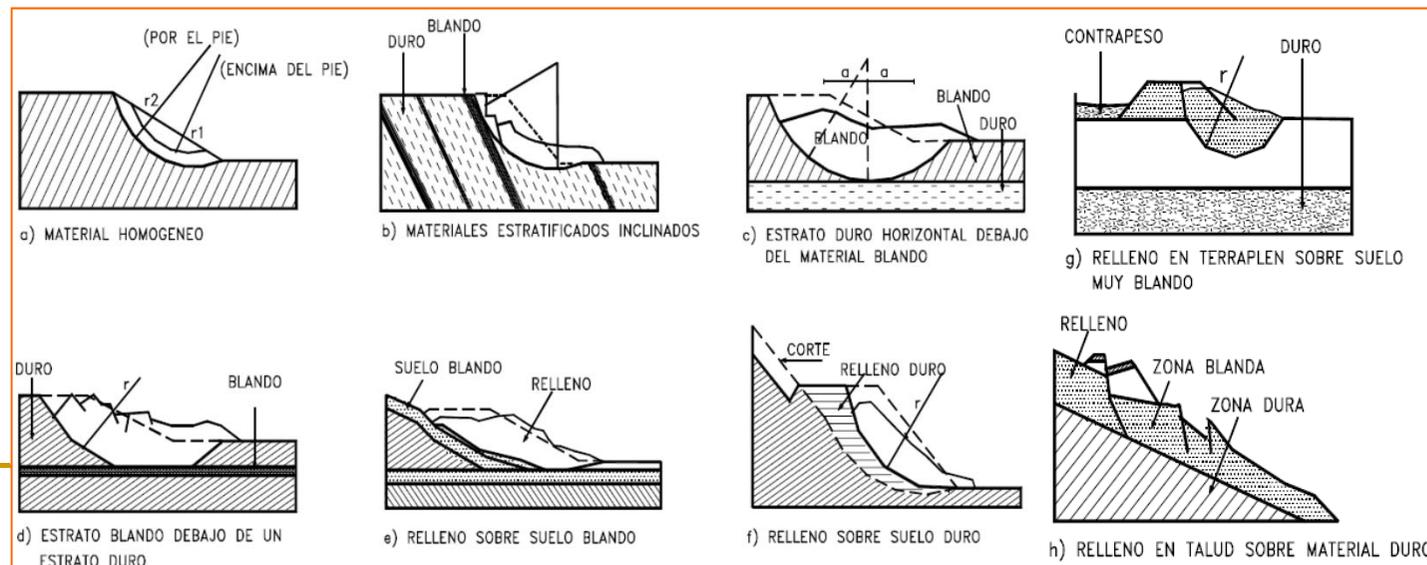
Nomenclatura del deslizamiento

4.2.2.1.4.1.) Deslizamiento rotacional

- La **Profundidad de la superficie de falla (D_r)** es la máxima profundidad de la superficie de falla respecto a la superficie original del terreno
- La **Longitud de la superficie de la falla (L_r)** es la mínima longitud desde el pie de la superficie de la falla y la corona
- Los deslizamientos rotacionales en suelos tienen una relación $(D_r)/(L_r)$, entre 0,15 y 0,33 (Skempton y Hutchinson, 1969)
- La forma y localización de la superficie de falla está influenciada por las discontinuidades, juntas y planos de estratificación



Orientación de los árboles



Efectos de la estructura en la formación de deslizamientos a rotación

4.2.2.1.4.1.) Deslizamiento rotacional



La Conchita (California)

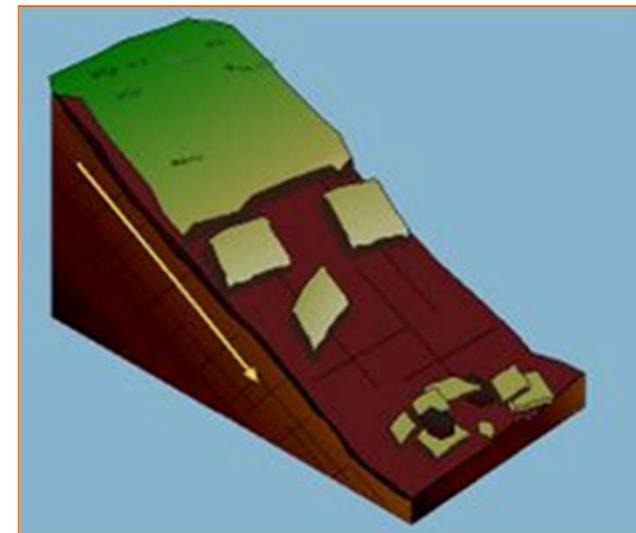


Múltiples deslizamientos rotacionales



4.2.2.1.4.2.) Deslizamiento de traslación

- El movimiento de la masa se desplaza hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana
- Tienen una relación $D_r / L_r < 0,1$
- La diferencia entre las dos formas de deslizamiento reside en la aplicabilidad de los distintos sistemas de estabilización
- El deslizamiento rotacional tiende a autoestabilizarse, mientras que el de traslación puede progresar indefinidamente a lo largo de la ladera hacia abajo
- Los movimientos de traslación están controlados por superficies de debilidad tales como fallas, juntas, fracturas, planos de estratificación y zonas de cambio de estado de meteorización que corresponden a cambios en la resistencia de corte de los materiales o por el contacto entre roca y materiales blandos
- En muchos casos, la masa se deforma y/o rompe y se acaba convirtiendo en un flujo
- **deslizamiento de bloque** → deslizamientos sobre discontinuidades sencillas en roca
- **deslizamiento de cuña** → deslizamientos sobre dos discontinuidades
- **falla en escalera** → deslizamientos sobre varios niveles de una familia de discontinuidades



Deslizamiento de traslación

4.2.2.1.4.2.) Deslizamiento de traslación



*Diferentes
deslizamientos
traslacionales
en Órgiva
(Granada)*



*Almegíjar
(Granada)*



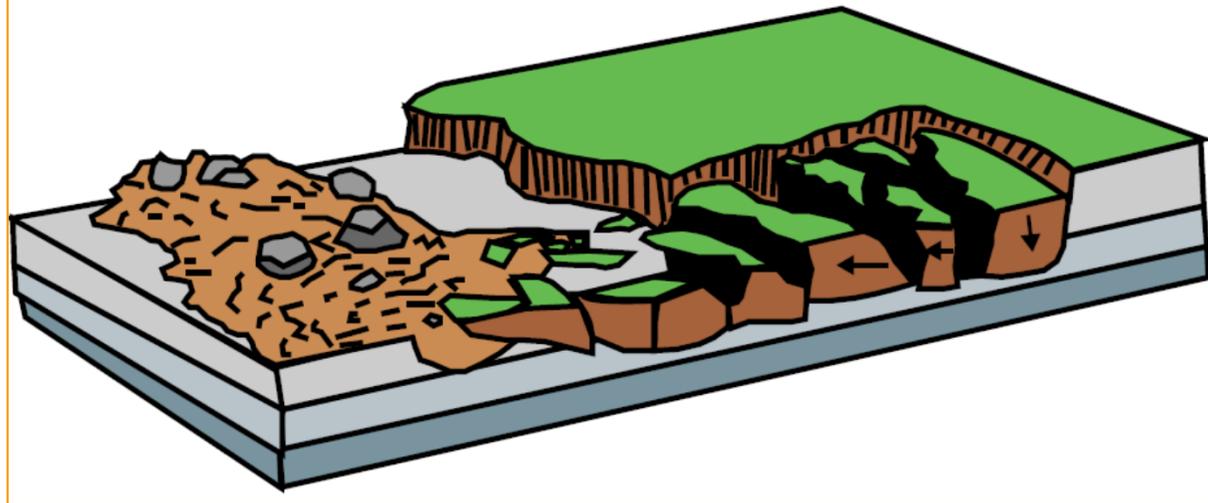
*Deslizamiento
traslacional
dormido*



*Deslizamiento
traslacional*

4.2.2.1.5.) Extensión lateral

- El movimiento dominante es la extensión lateral acomodada por fracturas de corte y tensión
- El mecanismo de falla puede incluir elementos no solo de rotación y traslación, sino también de flujo (ver fig)
- Ocurren en masas de roca sobre suelos plásticos y también se forman en suelos finos, tales como arcillas y limos sensitivos que pierden gran parte de su resistencia al moldearse. También son habituales en sedimentos glaciales y marinos
- Son movimientos complejos y difíciles de caracterizar
- La velocidad del movimiento suele ser extremadamente lenta.
- La falla es generalmente progresiva, iniciándose en un área local y extendiéndose



Esquema de una extensión lateral

4.2.2.1.5.) Extensión lateral

- **Se distinguen dos tipos;**

- **Movimientos distribuidos en una extensión pero sin una base de falla bien definida.** Esto ocurre en rocas, especialmente en crestas de serranías (la mecánica de este movimiento no es bien conocida)
- **Movimientos que envuelven fracturas y extensión de roca o suelo, debido a licuación o flujo plástico del material subyacente.** Las capas superiores pueden hundirse, trasladarse, rotarse, desintegrarse o pueden licuarse y fluir, (caso fotografías inferiores)



Olympia, Washington, USA



Olympia, Washington, USA



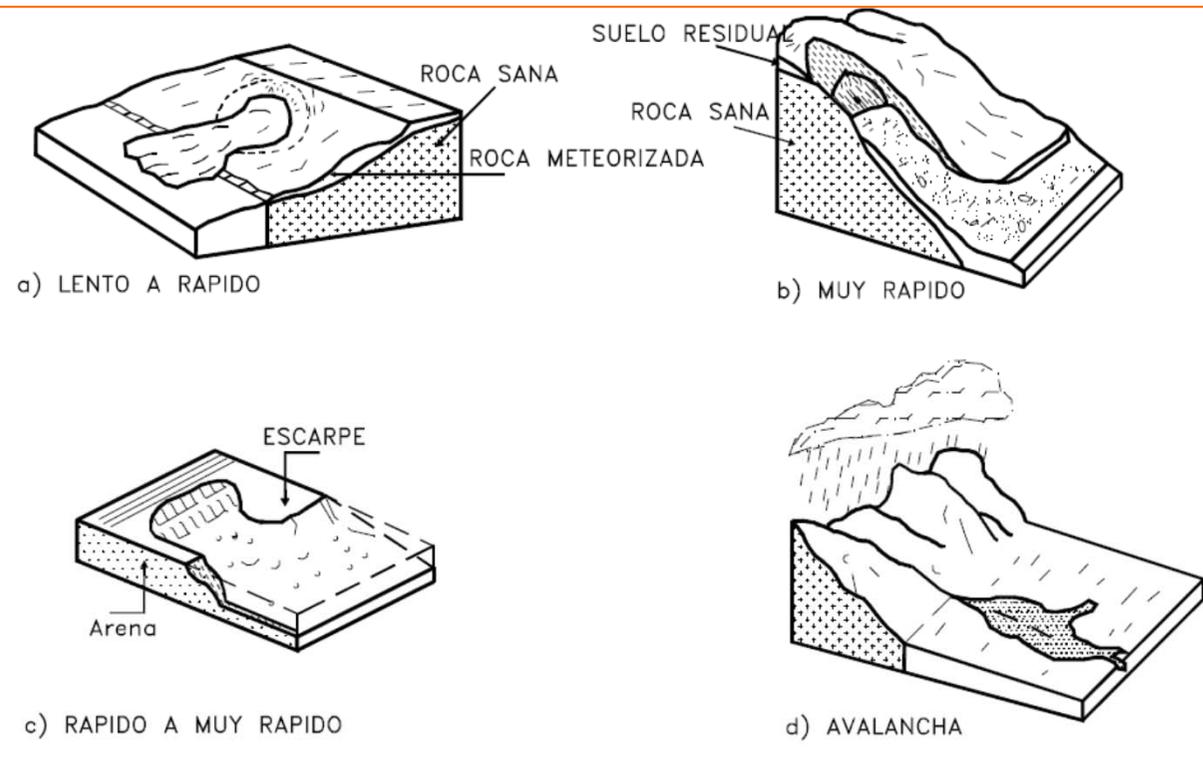
Perú. Licuación del material subyacente

4.2.2.1.6.) Flujo

- En un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla
- Los flujos pueden ser lentos o rápidos, secos o húmedos y de roca, residuos o de suelo o tierra
- Si el flujo es muy lento puede confundirse con fenómenos de reptación, pero a diferencia de éstos, en los flujos existe una superficie fácilmente identificable de separación entre el material que se mueve y el subyacente

• La ocurrencia de flujos está generalmente, relacionada con la saturación de los materiales subsuperficiales.

• Algunos flujos pueden resultar de la alteración de suelos muy sensitivos, tales como sedimentos no consolidados



Flijos de diferentes velocidades

4.2.2.1.6.) Flujo

• Los flujos, atendiendo al material movilizado, pueden clasificarse en;

–FLUJOS DE ROCA

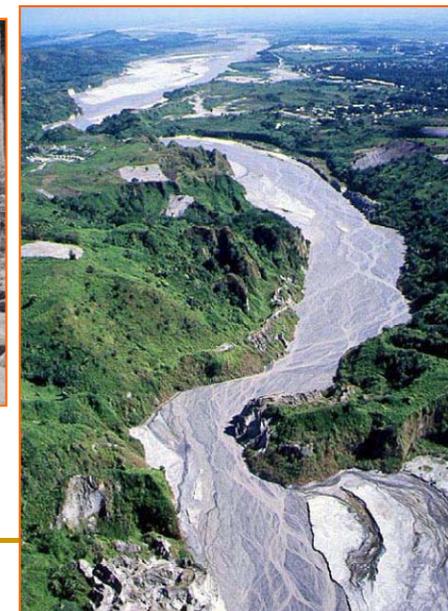
- Relación de estos flujos con perfiles de meteorización poco profundos, en los que las fallas están relacionadas con cambios de esfuerzos y lixiviación, ocasionados por la filtración momentánea del agua las primeras horas después de una lluvia fuerte
- Son ligeramente húmedos y su velocidad tiende a ser rápida a muy rápida
- Se dan generalmente, en zona de alta montaña y poca vegetación. Pendientes de estos taludes $> 45^\circ$
- Su ocurrencia es mayor en rocas ígneas y metamórficas muy fracturadas

FLUJOS DE RESIDUOS

- Generalmente, un flujo de rocas termina en uno de residuos
- Los materiales se van triturando por el mismo proceso del flujo, observándose diferencia importante de tamaños entre la cabeza y el pie del movimiento
- Puede ser activado por las lluvias (pérdida de resistencia al saturarse el material) o por el desarrollo de fuerzas debidas al movimiento del agua subterránea
- Los daños causados abarcan áreas importantes
- Si son producto de la erupción de volcanes, se denominan Lahares



Rastro dejado tras el paso de un flujo de residuos



flujo de residuos

4.2.2.1.6.) Flujo

–FLUJO DE SUELO

- Pueden ser también secos y su velocidad depende de la humedad y la pendiente de la zona de ocurrencia
- En zonas desérticas y de alta montaña se dan flujos muy secos, y generalmente pequeños pero de velocidades altas

Flujo de lodos



Flujo de suelos

–FLUJOS DE LODO

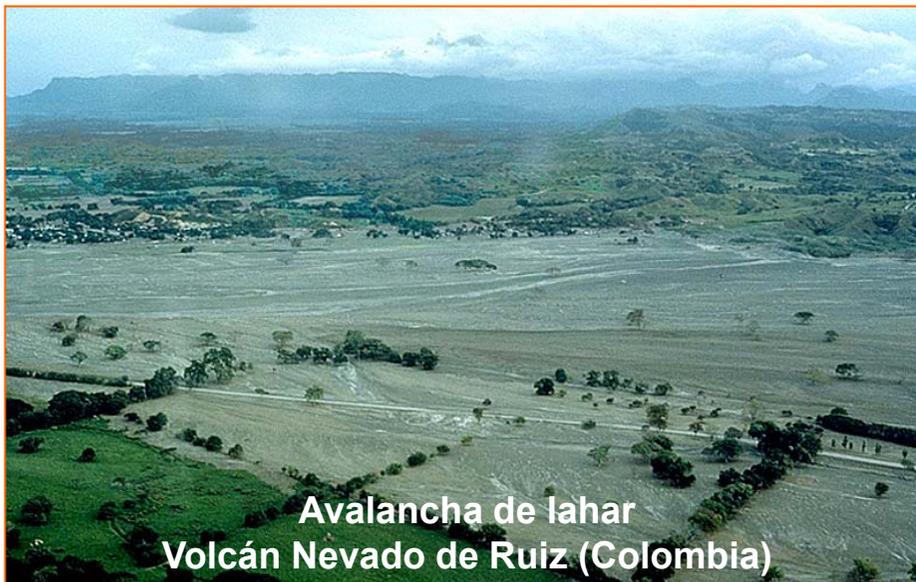
- Son flujos de suelo, en los que el material es muy fino y la humedad muy alta, llegando al punto de suelos suspendidos en agua
- Contiene al menos 50% de granos de arena, limos y partículas arcillosas
- Poseen fuerzas destructoras grandes que dependen de su caudal y velocidad
- Posee tres unidades morfológicas;
 - Origen (deslizamiento)
 - Canal de flujo
 - Zona de acumulación

4.2.2.1.7.) Avalanchas

- La falla es muy rápida y el flujo desciende formando una especie de “ríos de roca y suelo”
- Causas que las ocasionan; Lluvias (más acusado en ausencia de vegetación), deshielos, movimientos sísmicos
- Son generadas a partir de un gran aporte de materiales de uno o varios deslizamientos o flujos combinados con un volumen importante de agua
- Pueden lograr velocidades muy altas (más de 50 m/s) con gran poder destructivo y que corresponden generalmente, a fenómenos regionales dentro de una cuenca de drenaje



Avalancha 5/10/2005, Guatemala



**Avalancha de lahar
Volcán Nevado de Ruiz (Colombia)**



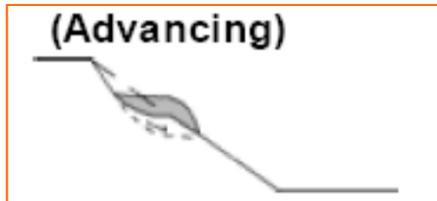
4.2.2.1.8.) Movimientos complejos

- Se denomina movimiento “complejo” a la combinación de dos o más de los tipos de desplazamientos definidos anteriormente
- Adicionalmente, un tipo de proceso activo puede convertirse en otro a medida que progresa el fenómeno de desintegración (p.e; una inclinación puede terminar en caído o un deslizamiento en un flujo)

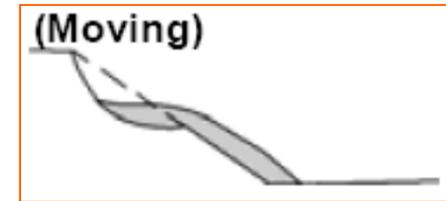


*Movimientos complejos en Tablones
(Granada)*

4.2.2.2.) Secuencia



•**PROGRESIVO**; La superficie de falla se extiende en la misma dirección del movimiento



•**MOVIÉNDOSE**



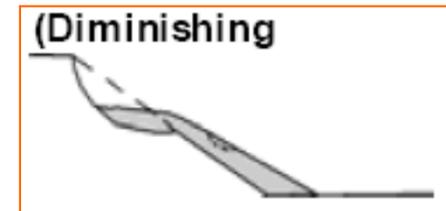
•**RETROGRESIVO**; La superficie de falla se extiende en dirección opuesta al movimiento



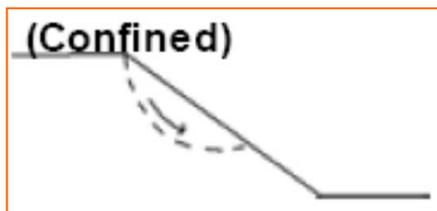
•**AMPLIÁNDOSE**; La superficie de falla se extiende hacia una u otra de las márgenes laterales



•**ALARGÁNDOSE**; La superficie de falla se alarga agregando continuamente volumen de material desplazado. La superficie puede alargarse en una o más direcciones

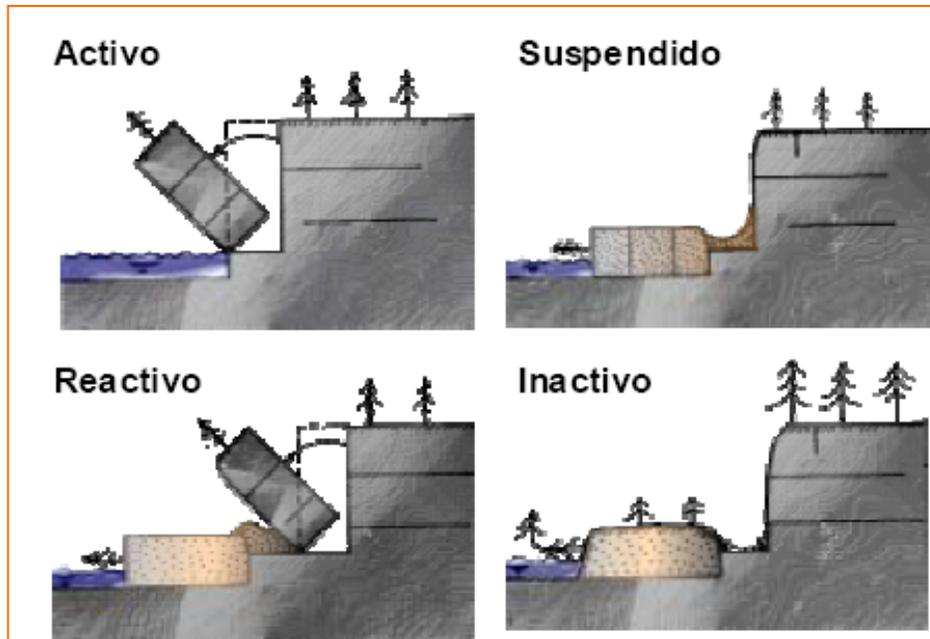


•**DISMINUYENDO**; El volumen de material siendo desplazado, disminuye con el tiempo



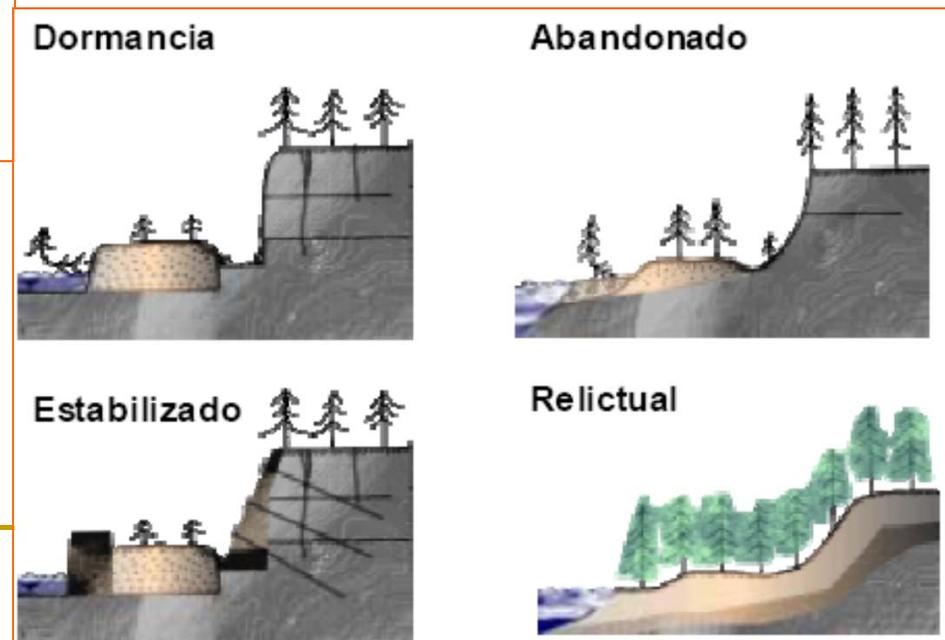
•**CONFINADO**; se refiere a movimientos que tienen un escarpe visible pero no tienen superficie de falla visible en el pie de la masa desplazada

4.2.2.3.) Estado de actividad

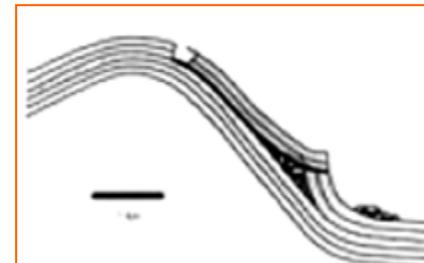
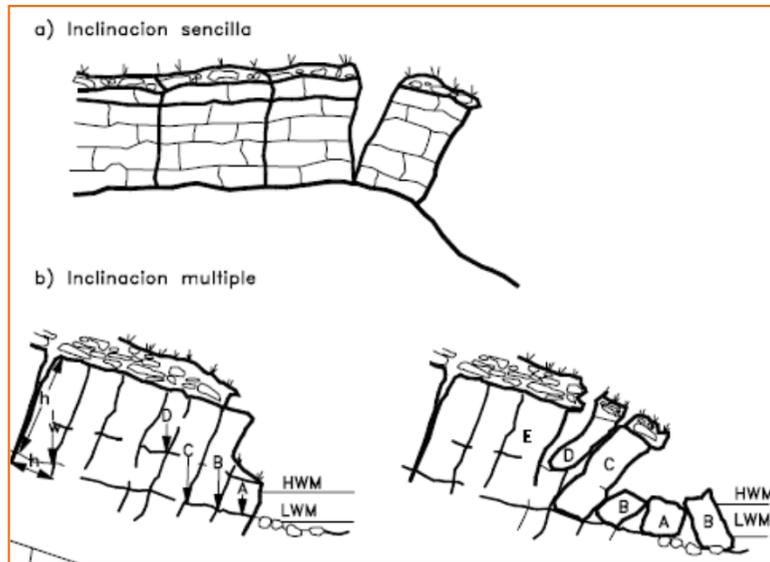


- **ACTIVO;** En movimiento actualmente
- **REACTIVO;** Nuevamente activo después de estar inactivo
- **SUSPENDIDO;** Han estado activos durante los últimos ciclos estacionales pero que no se están moviendo en la actualidad
- **INACTIVO;** Llevan varios ciclos estacionales sin actividad

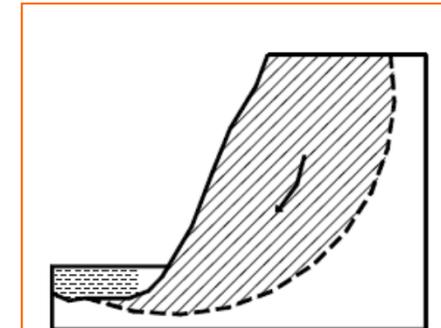
- **DORMIDO;** Inactivo pero que las causas del movimiento aparentemente permanecen
- **ABANDONADO;** Ha persistido la causa del movimiento (p.e. desvío de cauce de río que producía un deslizamiento)
- **ESTABILIZADO;** Movimiento suspendido por la intervención humana
- **RELICTO;** Movimientos que ocurrieron hace varios miles de años



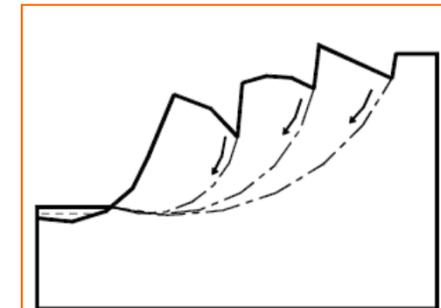
4.2.2.4.) Estilo



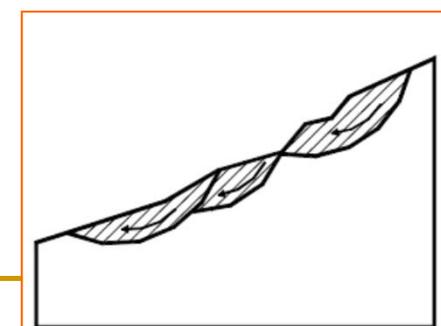
Movimiento compuesto



1) DERRUMBE ROTACIONAL SIMPLE



2) DERRUMBE ROTACIONAL MÚLTIPLE



3) DERRUMBE ROTACIONAL SUCESIVO

- **SENCILLO;** Un solo tipo de movimiento
- **COMPLEJO;** Tiene al menos dos tipos de movimiento (Ej; inclinación y deslizamiento)
- **COMPUESTO;** Ocurren simultáneamente varios tipos de movimiento en diferentes áreas de la masa desplazada
- **MÚLTIPLE;** Movimientos repetidos del mismo modo, generalmente ampliando la superficie de falla
- **SUCESIVO;** Movimientos repetidos pero que no comparten la misma superficie de falla

4.2.2.5.) Velocidad

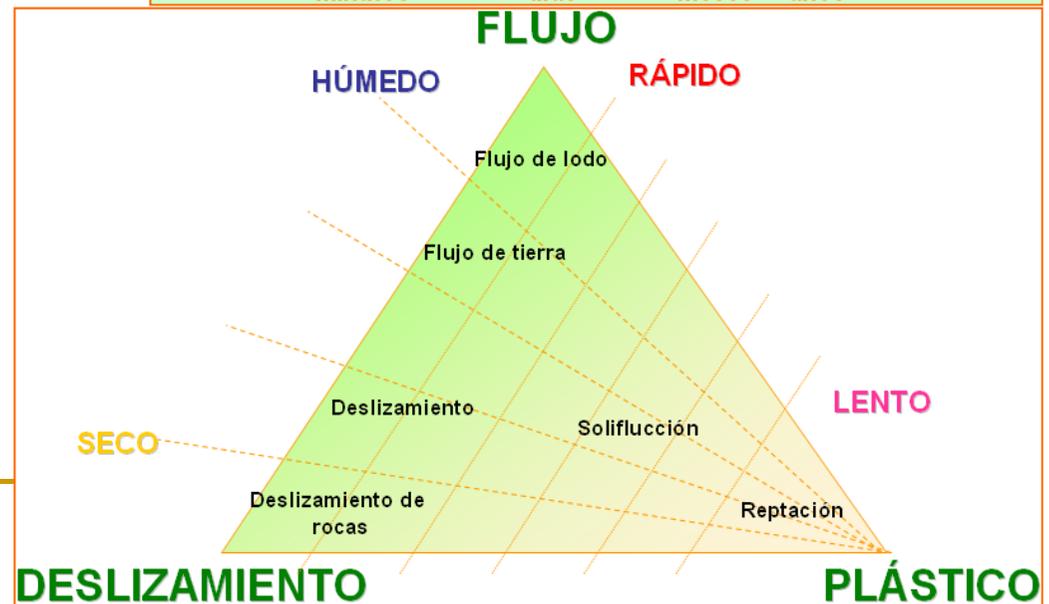
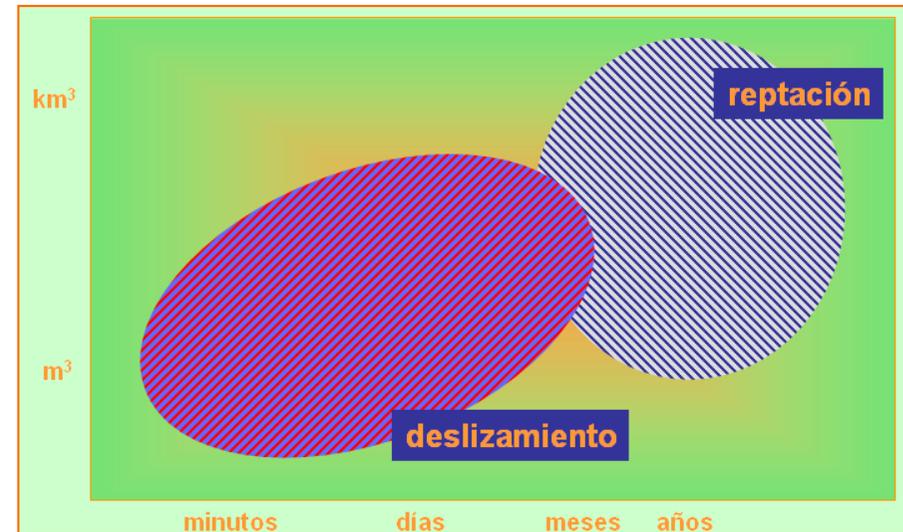
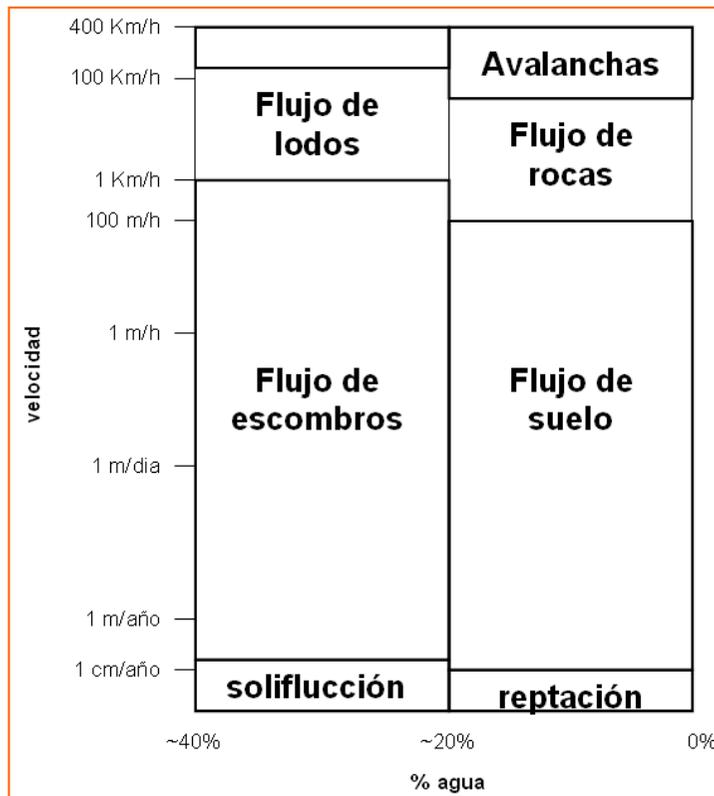
- La velocidad del movimiento tiene gran influencia sobre el poder destructivo de un deslizamiento. A mayor velocidad, más violencia y gran destrucción
- La relación entre el stress y el strength determina la velocidad;

–**RÁPIDO**; Stress excede al strength significativamente

–**LENTO, MOVIMIENTO GRADUAL**; Stress, excede al strength en un mínimo

Clase	Descripción	Velocidad (mm/sg)	Desplazamiento	Poder destructor
7	Extremadamente rápido			Catástrofe de violencia mayor; edificios destruidos por el impacto o el material desplazado, muchas muertes; escape improbable.
		5×10^3	5 m/seg	
6	Muy rápida			Alguna pérdida de vidas; velocidad demasiado alta para permitir a todas las personas escapar.
		5×10^1	3 m/min	
5	Rápida			Escape posible; estructuras, propiedades y equipos destruidos.
		5×10^{-1}	1.8 m/hora	
4	Moderada			Algunas estructuras temporales y poco sensitivas pueden mantenerse temporalmente.
		5×10^{-3}	13 m/mes	
3	Lenta			Construcciones remediales pueden llevarse a cabo durante el movimiento. Algunas estructuras insensitivas pueden mantenerse con mantenimiento frecuente.
		5×10^{-5}	1.6 m/año	
2	Muy lenta			Algunas estructuras permanentes no son dañadas por el movimiento.
		5×10^{-7}	16 mm/año	
1	Extremadamente lenta			Imperceptibles sin instrumentos; construcción posible pero deben tenerse precauciones.

4.2.2.5.) Velocidad



4.2.2.5.) Velocidad

V E L O C I D A D				
Material dominante	Naturaleza del movimiento	Lenta ($\leq 1\text{cm/año}$)	Moderada ($\geq 1\text{ Km/h}$)	Rápida ($\geq 5\text{ Km/h}$)
ROCA	Flujo			Avalancha
	Deslizamiento o caída		Deslizamiento de rocas	Caídos de roca
NO CONSOLIDADO	Flujo	Reptación	Flujo de tierra	Flujo de lodos
		Soliflucción	Flujo de escombros	Avalancha
	Deslizamiento o caída		Hundimiento	Deslizamiento de escombros

4.2.2.6.) Tipo de material y humedad

- **Los tipos de materiales que componen el movimiento en masa;**

- **ROCA**

- **RESIDUOS O DETRITOS**; Suelo que contiene una significativa proporción de material grueso, esto es, más del 20% del material en peso es mayor de 2mm de diámetro equivalente. Por lo general, deben existir partículas mucho mayores de 2 mm para que pueda considerarse de este tipo

- **TIERRA**; Al material de un deslizamiento que contiene más del 80% de las partículas menores de 2mm. Se incluyen los materiales desde arenas a arcillas muy plásticas

- **Se proponen cuatro términos para definir las condiciones de humedad;**

- **SECO**; No contiene humedad “visible”

- **HÚMEDO**; Contiene algo de agua pero no posee agua libre y puede comportarse como un sólido plástico pero no como un líquido

- **MOJADO**; Contiene suficiente agua para comportarse en parte como un líquido y posee cantidades visibles de agua que pueden salir del material

- **MUY MOJADO**; Contiene agua suficiente para fluir como líquido, aún en pendientes bajas

4.2.3.) Movimientos post-falla

• Son movimientos en los cuales la energía inicial es máxima y va disminuyendo progresivamente.

• La energía tiene tres componentes principales;

–ENERGÍA POTENCIAL

- Determinada por las características geométricas y la localización del talud
- El valor al final de la falla y su evolución posterior nos ayuda a predecir el comportamiento del movimiento
- La energía potencial se convierte en energía cinética

–ENERGÍA ROZAMIENTO

- Depende del comportamiento tensión-deformación del suelo
- Alcanza valores elevados en suelos no cohesivos

–ENERGÍA DE REMOLDEO O DESMORONAMIENTO

- En suelos residuales no saturados y en rocas la energía de remoldeo disipa buena parte de la energía potencial
- Se ha observado que los flujos de rocas y detritos alcanzan distancias superiores cuando no se desmoronan
- En arcillas, la energía de remoldeo puede considerarse proporcional a la resistencia al corte no drenado y al índice de plasticidad
- Entre menor resistente el material, la energía de remoldeo es menor, y por lo tanto, la disipación de energía cinética menor, aumentándose la longitud de recorrido del movimiento

4.2.3.) Movimientos post-falla

Longitud de recorrido del movimiento

- Al movimiento posterior a la falla no son de aplicación los principios de la mecánica de suelos, sino los de la mecánica de fluidos en un modelo viscoplástico
- Se pueden realizar las siguientes observaciones;
 - La relación entre el volumen de falla y la distancia de recorrido depende del nivel de humedad o saturación de los materiales
 - La distancia de recorrido generalmente, aumenta con el volumen de la masa fallada
 - La energía y la longitud de recorrido aumenta con la altura del deslizamiento
 - La relación $\text{Log}(\text{longitud})-\text{Log}(\text{volumen})$ es esencialmente lineal, proponiéndose una pendiente de 0,16 entre los dos valores

4.3.) Rasgos y síntomas de inestabilidad

- **Manantiales, filtraciones o suelos saturados en áreas que generalmente no están húmedas**
- **Desarrollo de grietas o abultamientos en el terreno**
- **Movimiento relativo del suelo** (p.e. dejar al descubierto cimentaciones de estructuras)
- **Percepción de movimiento** (asentamientos diferenciales y desplazamientos horizontales) **o fisuración en estructuras e infraestructuras;**
 - *En edificios*; agrietamientos, dificultad de cierre de puertas y ventanas, inclinaciones
 - *En obras lineales*; agrietamientos, apreciación de discontinuidades
 - *En servicios y tuberías*; discontinuidad, pérdida de estanqueidad
 - *En obras subterráneas*; aparición de agrietamiento, movimiento relativo de dovelas, filtraciones de agua (nuevas o incremento ostensible de caudal en las existentes), contracción de la sección de túnel
 - *En postes telefónicos o eléctricos*; inclinación de éstos
 - *En cierres y vallados*; desalineación y/o marcado el movimiento en la traza
- **Variaciones súbitas del nivel del agua de un arroyo;**
 - Incremento de éste, posiblemente acompañado por aumento en la turbidez del agua
 - Descenso del nivel, incluso a pesar de estar teniendo aporte (lluvias recientes)