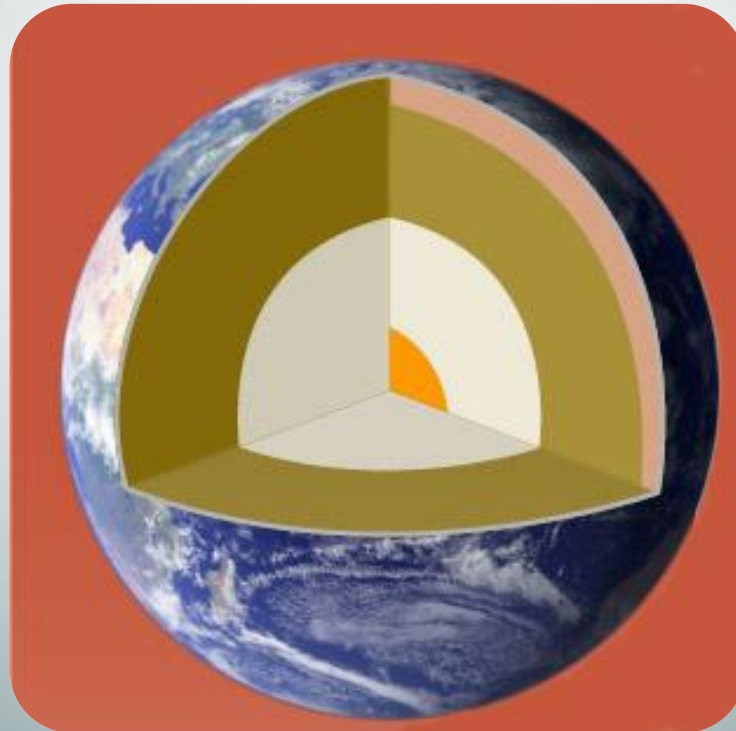


Geología

Tema 11. Procesos de ladera



- La erosión (I).
- La erosión es un proceso natural que forma parte del ciclo geomorfológico (erosión-transporte-sedimentación), ligado a la dinámica evolutiva de la superficie del planeta.
- La erosión por el agua o hídrica es el proceso de disgregación y transporte de las partículas del suelo por la acción de las aguas.
- El proceso erosivo comienza con el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo. El agua escurre en múltiples filetes sinuosos de agua, entrelazados, cambiantes, que remueven más o menos uniformemente las partículas más finas del suelo. Esta es la erosión laminar.
- A la erosión laminar sigue la erosión en surcos que abre pequeños canales, de algunos cm de profundidad, en zonas donde se produce la concentración de la escorrentía.

La erosión (II)

- El aumento de la cantidad de agua en los surcos origina su profundización y ensanchamiento con dimensiones tan grandes que resultan infranqueables. Es la erosión en cárcavas o en barrancos.
- Esta última fase erosiva es de consecuencias muy graves puesto que supone la pérdida total del horizonte A del suelo y hasta el 25% del B, la puesta al descubierto de más de la mitad del subsuelo y unas tasas de pérdida de suelo superiores a las 100 tm/ha/año, equivalentes a 6-7 mm/año de espesor.
- La erosión hídrica es un grave problema ambiental a escala española y mundial.
- Los procesos, causas, factores y consecuencias de la erosión son los que a continuación se relacionan:

Procesos, causas, factores y consecuencias de la erosión

Procesos	Causas	Factores	Consecuencias
Degradación de los suelos	Mineralización de la materia orgánica	Temperatura Humedad Biomasa restituída al suelo	Disminución de: 1)La tasa de materia orgánica 2)Humedad y nutrientes 3)De la porosidad e infiltración Incremento del arroyamiento
Erosión laminar	Lluvias torrenciales Compactación Cizallamiento Proyección de los agregados del suelo	Cubierta vegetal $C=1$ a $0,001$ Pendiente $SL=0,1$ a 20 Erosionabilidad del suelo $K=0,01$ a $0,30$ Prácticas de cultivo y protección del suelo $P=1$ a $0,1$	Costas por compactación Arroyamiento Erosión selectiva Descabezamiento de horizontes humíferos
Tubificaciones	Lluvias intensas	Suelos con sales	Pérdida de suelo por tubos
Erosión por impacto	Energía de las gotas de lluvia	Intensidad Frecuencia Pendiente Friabilidad del suelo	Decapitación de los horizontes superiores
Arroyamiento/escorrentías concentradas	Energía de la arroyada	Volumen de agua escurrida (depende del impluvium y de la intensidad del aguacero) Velocidad (pendiente, rugosidad) Resistencia del suelo y eficacia de la vegetación	Regatos, surcos Entalladuras profundas (cárcavas) Desequilibrio de las laderas Conos detríticos Abarrancamiento/badlands
Deslizamientos en masa	Gravedad y efecto de la cizalladura mayores que las fuerzas de cohesión	Peso de la cobertura (suelo+agua+vegetación) Pendiente y drenaje	Arrasamiento de cumbres y laderas. Coladas de lodo

La cuantificación de la erosión

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

Los principales factores controlantes de la erosión son los que se relacionan en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, o Universal Soil Loss Equation), debida a Taylor (1970), y cuya expresión es:

$$A = 2,24 \cdot R \cdot K \cdot (LS) \cdot C \cdot P$$

En la cual:

- A = pérdida media anual del suelo en tm/ha.
- R = factor de lluvia (kg/ha) (se calcula mediante un cuadro de valores).
- K = factor de erosionabilidad del suelo (tm/ha. l/R) (se calcula mediante un cuadro de valores).
- LS = factor topográfico. Es adimensional (se calcula mediante un cuadro de valores).
- C = factor de cultivo y ordenación. Es adimensional (se calcula mediante un cuadro de valores).
- P = factor prácticas de conservación. Es adimensional y sus valor varía entre 0,25 y 1 (el valor 1 cuando no existen prácticas de conservación).

Erosión en Badland (Almería)



Erosión en laderas (Bárdenas Reales)



La evolución de las laderas

- Toda superficie inclinada natural (LADERA) está influenciada por la gravedad y puede ser modificada por movimientos en masa ladera abajo (movimientos de ladera).
- Con el término movimiento de ladera o de pendiente, se alude a un amplio espectro de procesos influenciados por la gravedad y que provocan el transporte ladera debajo de roca, regolito o suelo.
- Se denomina deslizamiento del terreno (landslide), o simplemente deslizamiento, cualquier movimiento de ladera.
- Los efectos combinados de los procesos gravitacionales y de las aguas de escorrentía producen valles fluviales. El proceso de general de erosión y de ampliación de un valle permite diferenciar en el mismo dos zonas:
 - El área erosionada por la corriente fluvial, circunscrita al cauce del río.
 - Las áreas (laderas) removidas por los movimientos de masas (deslizamientos) que contribuyen a ensanchar el valle.

Estabilidad e inestabilidad

- En la estabilidad/inestabilidad de una ladera o talud intervienen simultáneamente diversos factores, por lo que es difícil plantear cuál o cuáles son la causa del deslizamiento.
- En muchos casos cuando se estudia la aparición de un deslizamiento se observa que se ha producido por la modificación de un solo parámetro, por ejemplo el aumento de la presión del agua subterránea.
- En el desencadenamiento de un deslizamiento concurren unos factores de susceptibilidad externos e internos y determinados valores críticos que facilitan la ocurrencia del proceso.

Factores de estabilidad/inestabilidad

- Los factores externos aumentan las fuerzas desestabilizadoras, sin ejercer acciones de resistencia, tales como: removilizaciones del terreno, vibraciones (sacudidas sísmicas, explosiones, etc.), licuefacción (disminución brusca de la porosidad que provoca la expulsión del agua intersticial y la movilización del material según un comportamiento semifluido), fluidificación, cambios climáticos, etc.
- Los factores internos, disminuyen las fuerzas de resistencia sin que al mismo tiempo atenúen las desestabilizadoras, se producen como consecuencia de cambios propios del material como: meteorización (modificación de las propiedades mecánicas tales como la cohesión, elasticidad y porosidad), caídas progresivas de material que origina un proceso de descarga.

Controles y desencadenantes de los procesos de ladera

Factores controlantes.

- Tipo de vegetación.
- Ángulo de la pendiente.
- Clima y contenido en agua.
- Geología de la vertiente.

Factores desencadenantes.

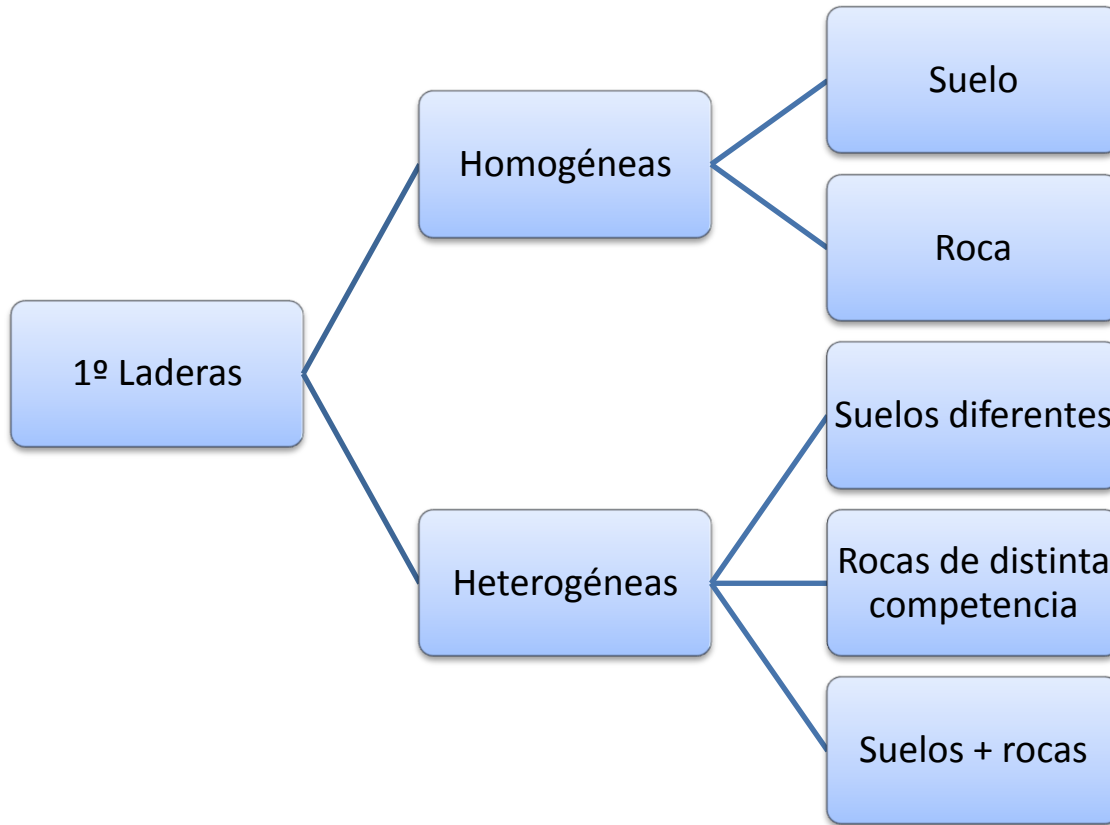
Terremotos como desencadenantes.

- Pueden causar licuefacción.
- Los materiales superficiales saturados se convierten en masas que fluyen como los fluidos.

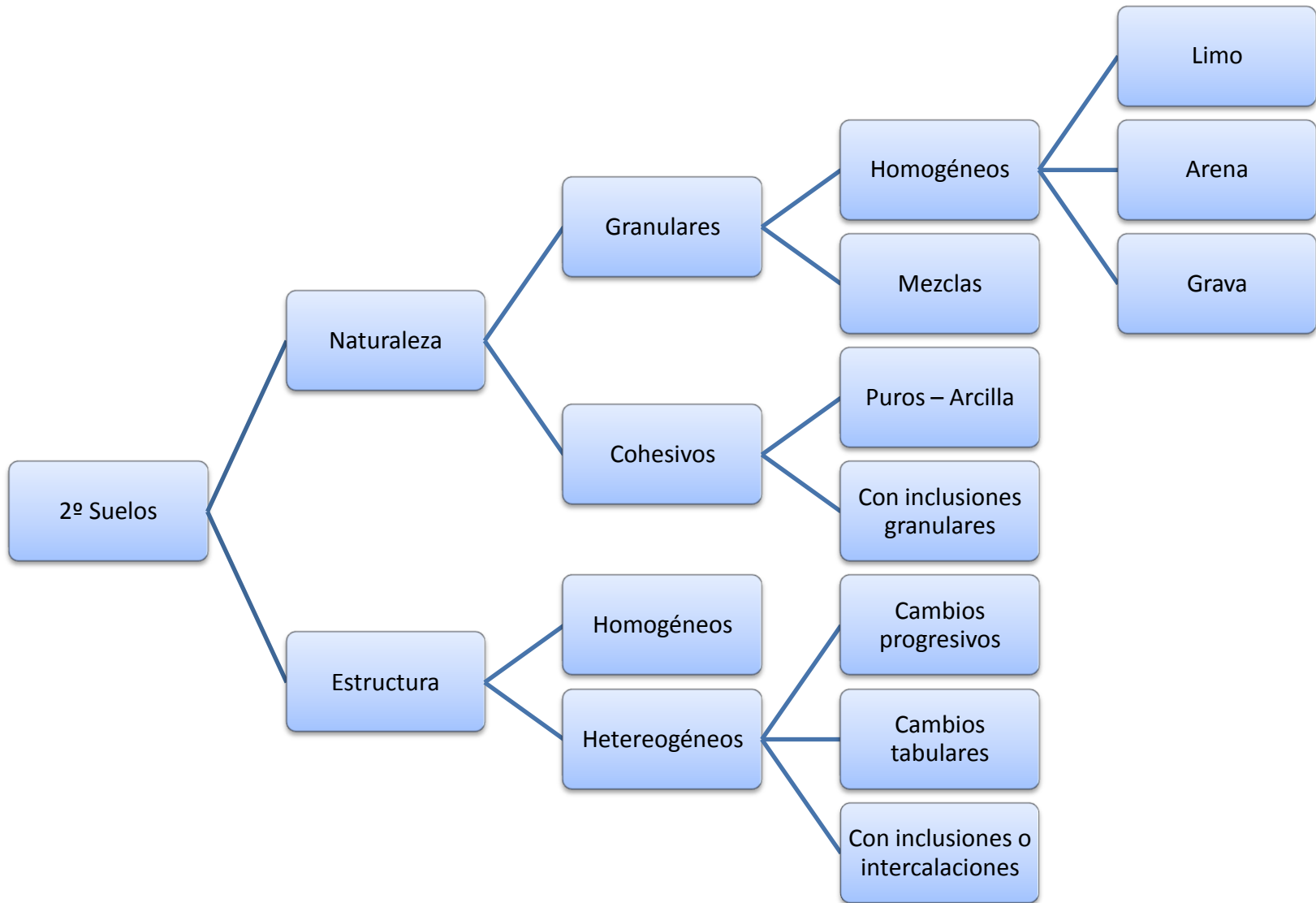
Factores condicionantes y factores desencadenantes

- **Factores condicionantes:** vienen dados por las características resistentes de las laderas (o vertientes) y por los esfuerzos que se generan en ellas. Son prácticamente constantes, tales como tipo de material y estructura, y permiten definir la **susceptibilidad** del terreno a los deslizamientos.
- El detalle y características de estos factores, muy importantes a la hora de analizar la **susceptibilidad del terreno** a deslizarse, son los siguientes:
 - + **Factores litoestructurales.**

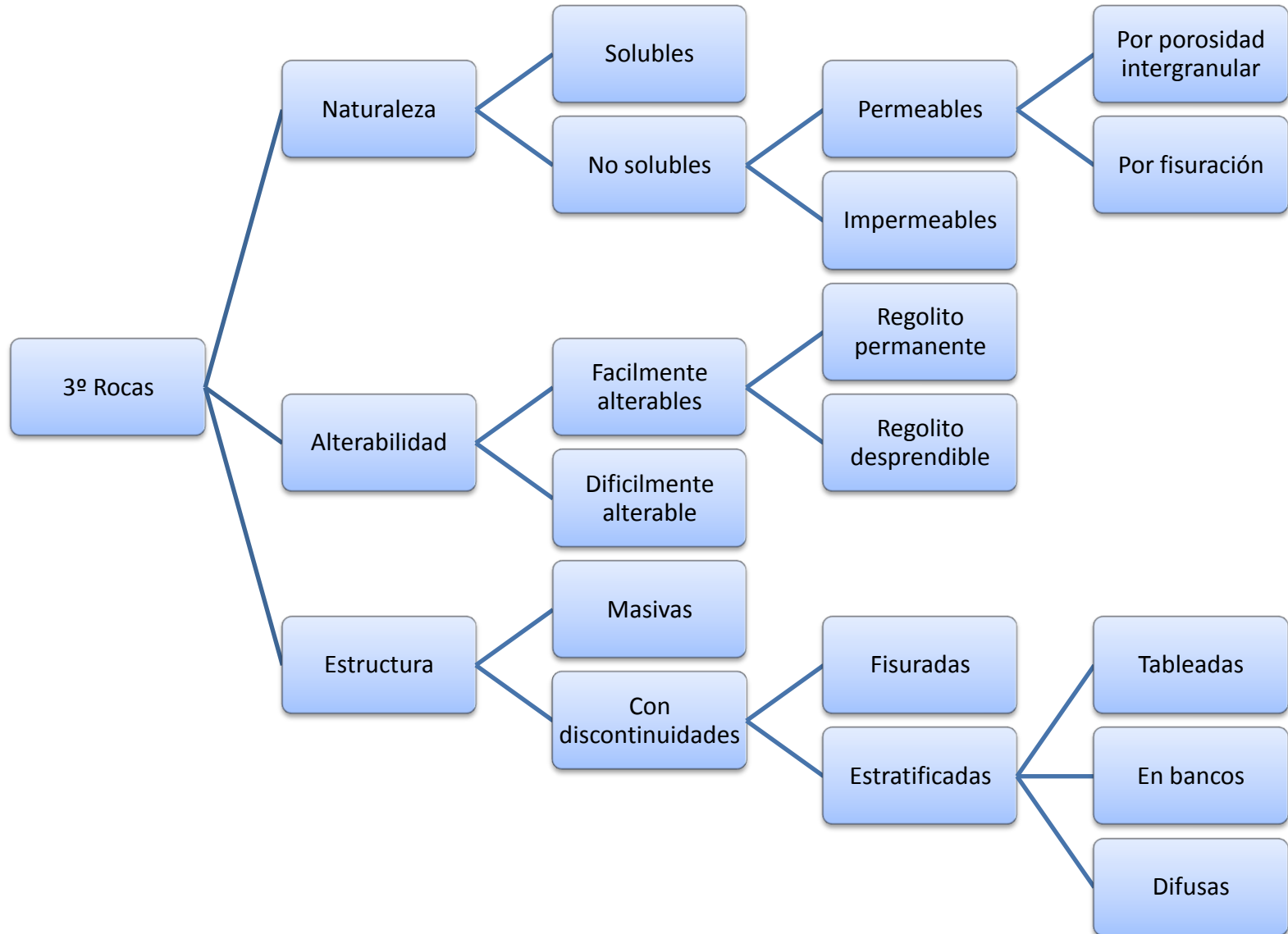
Tema 11. Procesos de ladera



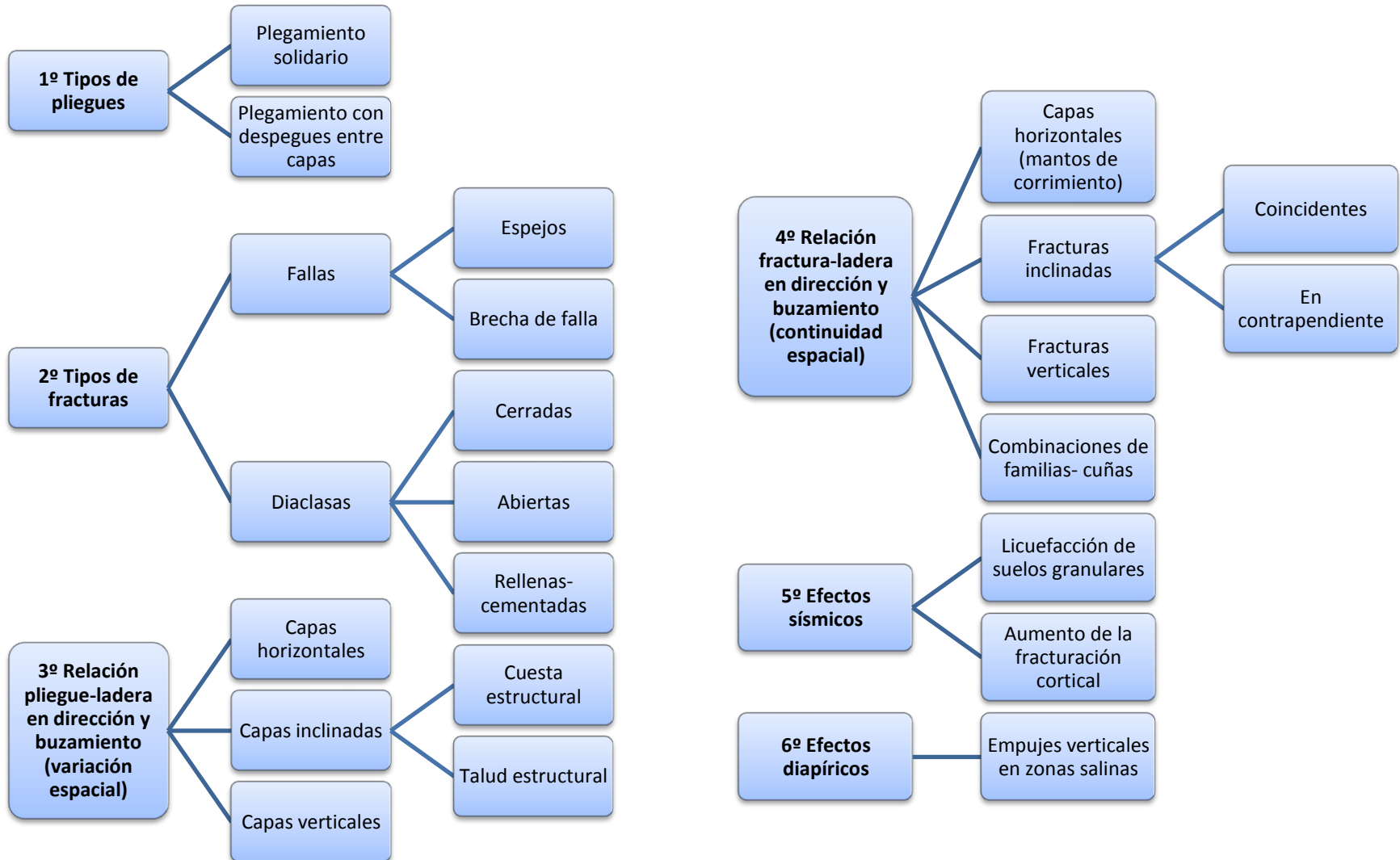
Tema 11. Procesos de ladera



Tema 11. Procesos de ladera

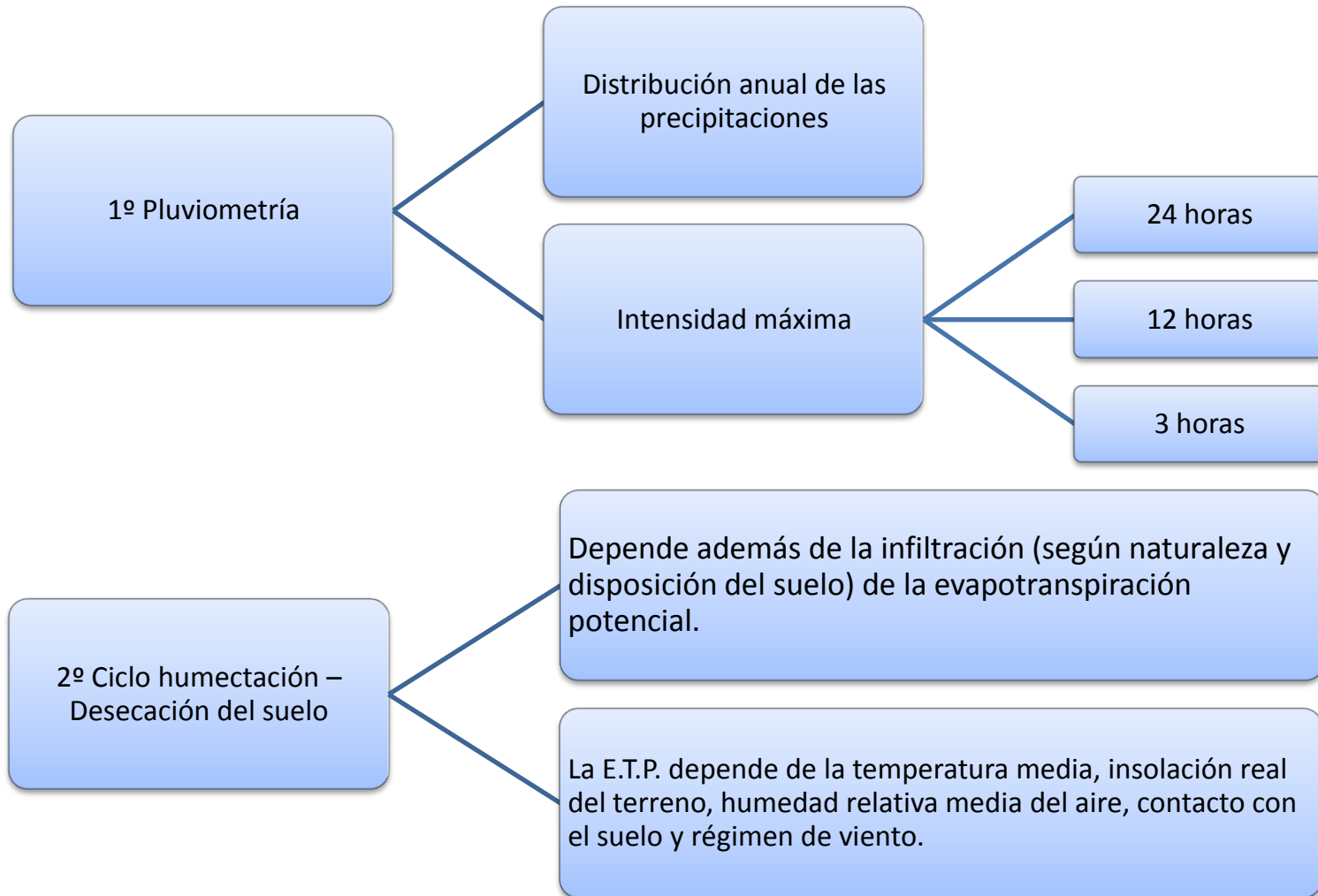


Factores tectónicos condicionantes de la estabilidad en las laderas



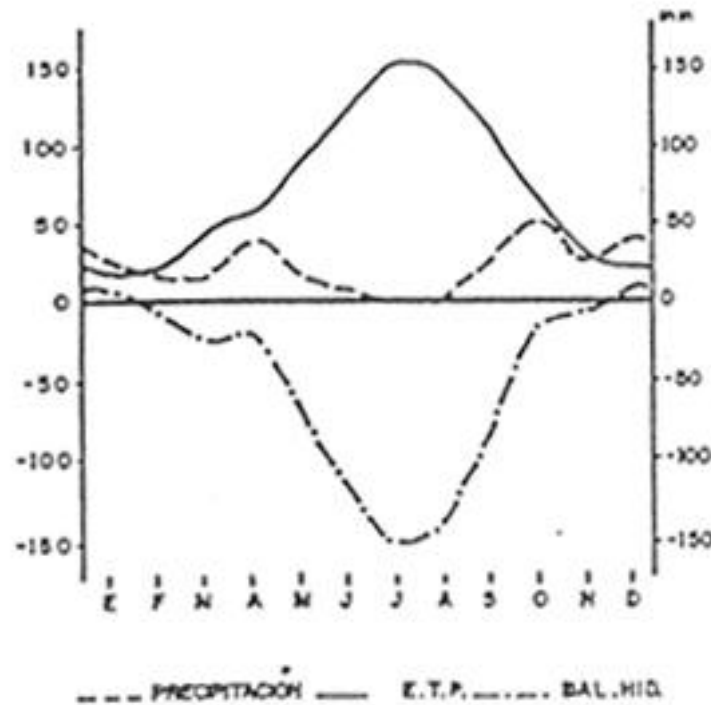
Factores climáticos condicionantes de la estabilidad de la ladera

Factores climáticos



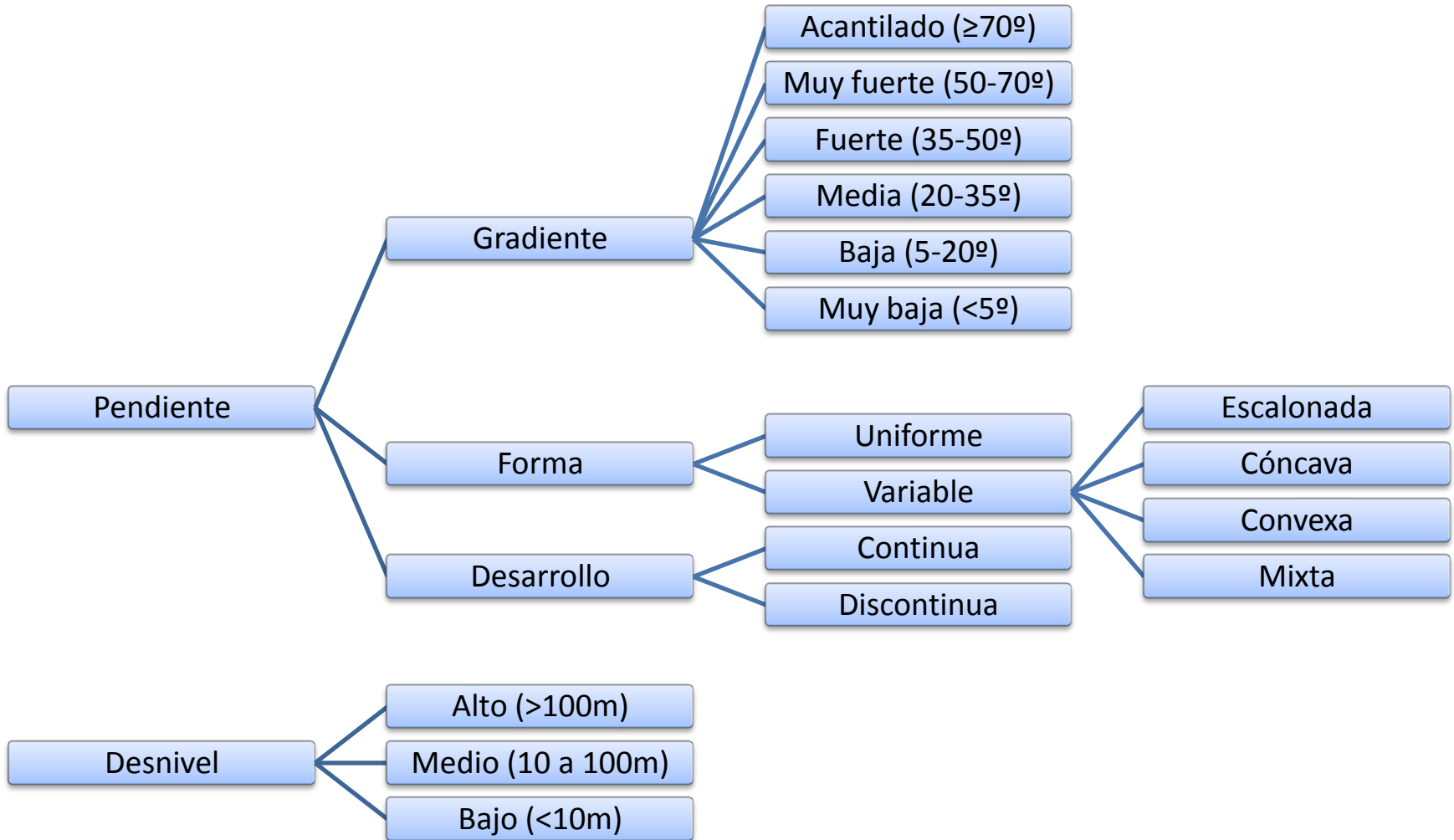
Factores climáticos condicionantes de la estabilidad de la ladera

Ejemplo de balance hídrico anual.



Factores climáticos condicionantes de la estabilidad de la ladera

Factores topográficos

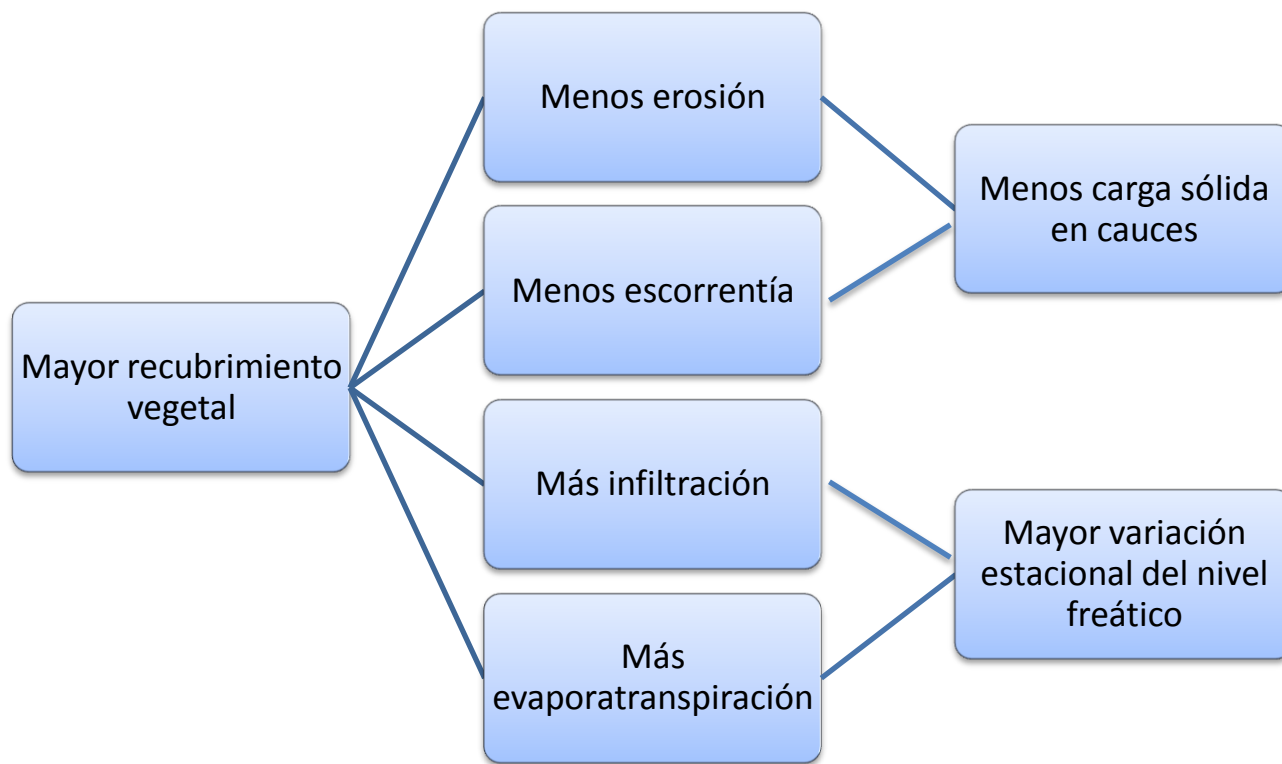


Factores de recubrimiento condicionantes de la estabilidad de laderas rotección frente a la erosión

INFILTRACION
 POTRANSPIRACION
 CON ESTACIONAL
 ATICO

Tipo de vegetación	Pendiente %					
	0-12	12-18	18-24	24-35	35-60	>60
Arbolado denso	1	1	1	1	1	1
Arbolado claro	1	0.8	0.6	0.6	0.4	0.4
Matorral	0.8	0.6	0.4	0.4	0.2	0.2
Pastizal bien conservado	0.9	0.8	0.8	0.7	0.4	0.4
Erial a pastos	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
Cultivos de secano Sin prácticas de conservación	0.9	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Cultivos de secano Con prácticas de conservación	1.0	0.9	0.6	0.6	0.4	0.0
Viñedo y frutales	0.6	0.4	0.2	0.2	0.0	0.0
Cultivos en regadío	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Factores de recubrimiento condicionantes de la estabilidad de laderas Protección frente a la erosión



Factores desencadenantes

- Factores desencadenantes: producen variaciones en las características de las vertientes, así como en los esfuerzos que en ellas se generan, rompiendo el equilibrio estático existente entre ellas.
- Los factores desencadenantes son modificables, tales como la pendiente, contenido en agua, etc., y a su vez pueden ser de tipo natural o antrópico:
 - De tipo natural: socavación por el agua encauzada, impregnación de los materiales por la lluvia, acción hielo/deshielo, crecimiento de la cobertera vegetal, actividad sísmica, etc.
 - De tipo antrópico: excavaciones por obras civiles, voladuras, sobrecargas, repoblaciones, deforestación, cambios de usos del suelo con incidencia en la infiltración y en la red de drenaje, etc.

Factor de estabilidad

En ocasiones, bien por causas naturales o bien por influencia humana, la estabilidad de las laderas y taludes deviene crítica, a partir de un factor de estabilidad (o de seguridad) que se expresa por:

$F = \text{fuerzas estabilizadoras} / \text{fuerzas desestabilizadoras}$

Para el cual cuando:

$F > 1$ (estabilidad)

$F \leq 1$ (inestabilidad)

Factor de estabilidad (continuación)

- La fuerza desestabilizadora más importante es, generalmente, el mismo peso de la masa deslizada, o más concretamente **el componente del peso en la dirección del deslizamiento**. A este factor se pueden añadir otras fuerzas exteriores (por ejemplo, las cargas transmitidas por cimentación de estructuras) o el empuje hidrostático del agua.

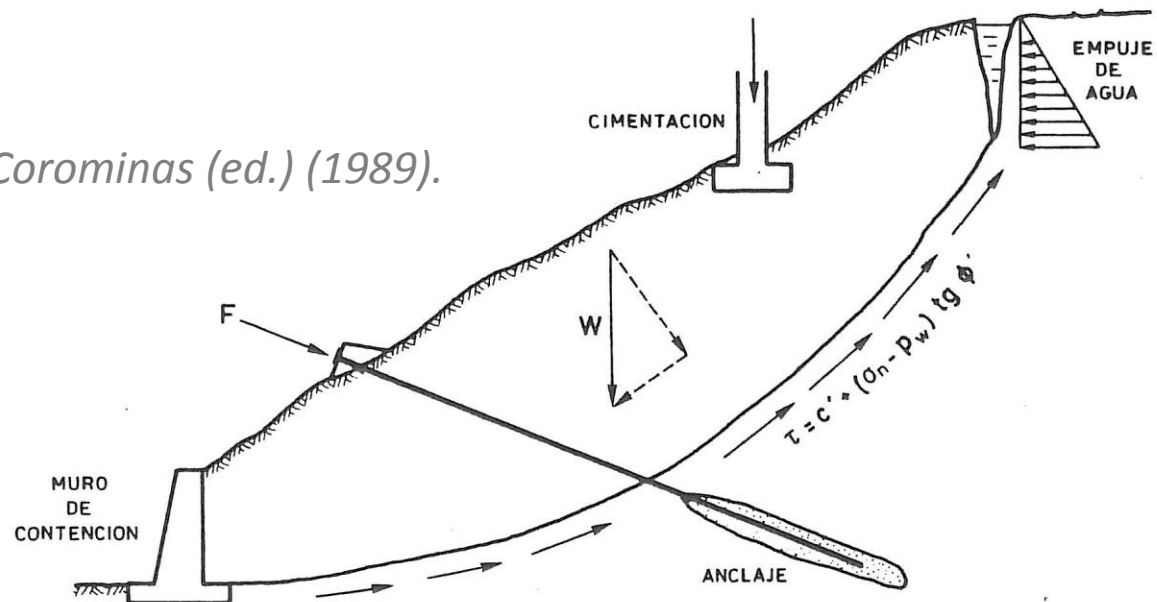


Fig. 1// pp.233. Jordi Corominas (ed.) (1989).

Resistencia de corte del terreno (criterio de rotura de Mohr-Coulomb)

Análogamente, la principal fuerza estabilizadora será la resistencia de corte del terreno en la superficie de deslizamiento. Según el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, la fuerza resistente por unidad de superficie (tensión, τ) puede expresarse como:

$$\tau = c' + (\sigma_n - \rho_w) \operatorname{tg} \phi'$$

Donde:

c' es la cohesión del terreno.

σ_n es la tensión normal.

ρ_w es la presión del agua.

ϕ' es el ángulo de fricción del terreno.

Resistencia de corte del terreno (continuación)

- En general c' es pequeña y la principal contribución a la resistencia procederá del segundo término de la expresión anterior ($\tau = c' + (\sigma_n - \rho_w) \text{tg } \phi'$).
- Tanto un aumento de la tensión normal σ_n como una disminución de la presión del agua ρ_w producirán un aumento de la resistencia del terreno (en este sentido, como más adelante se verá, las medidas de estabilidad y de corrección pueden proporcionar fuerzas estabilizadoras adicionales que se opongan al movimiento de deslizamiento).

Litologías estables/inestables

De entre todos los parámetros que intervienen en la estabilidad/inestabilidad de las laderas y taludes, la litología es el principal. Puesto que cada material presenta unas características resistentes específicas y, además, su estado de fracturación, permeabilidad, facilidad de meteorización, condicionan fuertemente la estabilidad.

- Estabilidad de los suelos (en sentido geotécnico).
- Se pueden clasificar en: suelos cohesivos y suelos no cohesivos.

Los suelos cohesivos comprenden arcillas, limos, arcillitas y limolitas compactas. Cuando se presentan en grosores potentes dan lugar a deslizamientos rotacionales, cuando el espesor es pequeño originan deslizamientos planares.

Los suelos no cohesivos están constituidos por fundamentalmente por material detrítico grueso (arenas, gravas, bloques, característicos de los depósitos aluviales, coluviones y tills), originando frecuentemente desprendimientos de bloques y cantos.

Estabilidad/inestabilidad de los macizos rocosos

- Las rocas presentan en general una elevada cohesión y resistencia, por lo que su comportamiento es distinto a los suelos. Sin embargo, existen en las rocas numerosas debilidades estructurales (planos de estratificación, diaclasas, fallas, planos de esquistosidad, etc) que reducen la resistencia del conjunto.
- Cuando estas discontinuidades no aparecen con una disposición desfavorable, pueden darse laderas o taludes de gran altura y fuerte pendiente que son estables.
- Los movimientos más característicos de los macizos rocosos son los desprendimientos, cabeceos, deslizamientos translacionales, flujos lentos, aludes de roca, etc.

Procesos de ladera y desarrollo de las formas del terreno

Las pendientes cambian con el tiempo.

- Para que los procesos de ladera ocurran no se necesita un ángulo mínimo.
- Los procesos de ladera más rápidos y espectaculares tienen lugar en zonas montañosas accidentadas y geológicamente jóvenes.
- Los procesos de ladera y erosivos rebajan lentamente el terreno.

El papel del agua/ángulo de reposo

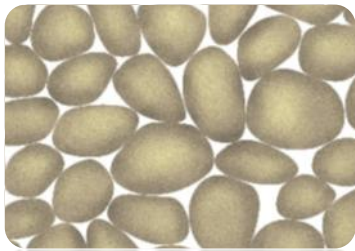
Papel del agua.

- Disminuye la cohesión entre partículas (fricción).
- El agua añade peso.

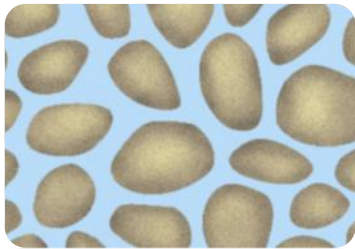
Pendientes sobreempinadas – ángulo de inclinación.

- La pendiente estable (ángulo de reposo) es diferente para los distintos materiales.
- Las pendientes sobreempinadas son inestables.

El efecto del agua en los procesos de ladera



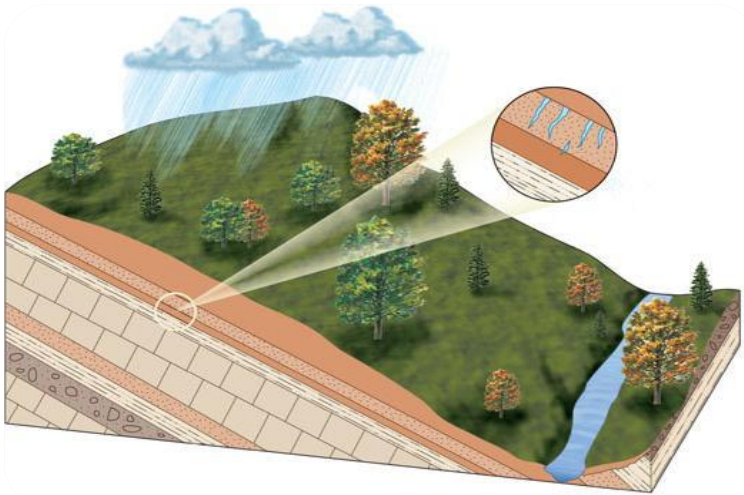
Suelo seco-alta fricción.
Pendiente estable.



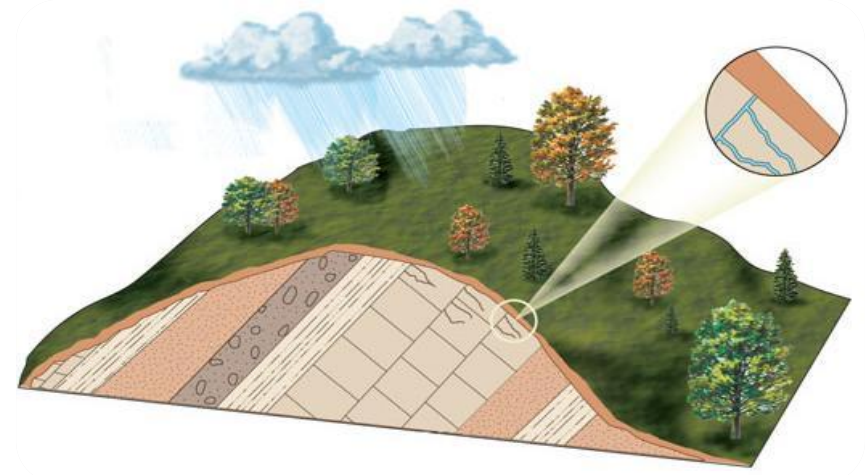
Suelo saturado.
Pendiente inestable.



El tipo y buzamiento de la roca condiciona la estabilidad



Las fracturas y su dirección condiciona la estabilidad



2006 Brooks/Cole - Thomson

Deslizamientos: mecanismos y tipos

Los criterios para clasificar los deslizamientos son muy diversos, de manera que existen numerosas clasificaciones y tipologías.

Las características y criterios más comunes para clasificar los deslizamientos son:

- Forma, volumen y naturaleza de la masa movida.
- Velocidad, forma y trayectoria del movimiento.
- Daños originados.
- Tipos y partes del movimiento.
- Otros.

Clasificación de los procesos de ladera

De forma general cada acontecimiento se clasifica por.

- Tipo de material.
 - Barro.
 - Tierra.
 - Roca.
- Tipo de movimiento.
 - Desprendimiento (caída libre de fragmentos).
 - Deslizamiento (material que se mueve a lo largo de una superficie bien definida como una masa coherente).

Expansión lateral



Clasificación de los procesos de ladera

De forma general cada acontecimiento se clasifica por:

- Tipo de movimiento.
 - Flujo (el material se desplaza como un fluido viscoso).
- Velocidad de movimiento.
 - Rápido.
 - Lento.

Debris Flow (Pirineo, Huesca)



Tipos de procesos de ladera

Desplomes.

- Movimiento de una masa de rocas o de material no consolidado que se mueve como una unidad a lo largo de una superficie curva.
- Se producen en pendientes excesivas.

Tipos de procesos de ladera

Deslizamientos de rocas.

- Los bloques rocosos se deslizan pendiente abajo.
- Suelen ser rápidos y destructivos.

Flujo de derrubios (coladas de barro).

- Consiste en suelo y regolitos con abundante cantidad de agua.
- Suelen encerrarse en canales.

Tipos de procesos de ladera

Flujo de derrubios.

- Riesgo importante de lluvias fuertes en las regiones áridas.
- El flujo de derrubios compuesto por materiales volcánicos en los flancos de los volcanes se denomina lahar.

Tipos de procesos de ladera

Flujos de tierra

- Se forman en las laderas de las colinas en las regiones húmedas.
- El agua satura el suelo.
- Los materiales más comúnmente implicados son ricos en arcilla y limo.

Tipos de procesos de ladera

Movimientos lentos.

Reptación.

- Movimiento descendente gradual del suelo y el regolito.
- La expansión y contracción alternantes del material de superficie contribuyen a la reptación.

Detalle de troncos curvados por reptación del suelo



Tipos de procesos de ladera

Movimientos lentos.

Soliflucción.

- Una capa dura de arcilla densa en el suelo o una capa de lecho de rocas impermeables pueden contribuir a la soliflucción.
- Común en las regiones situadas por encima del permafrost.
- Puede ocurrir en pendientes suaves.

Deslizamientos submarinos

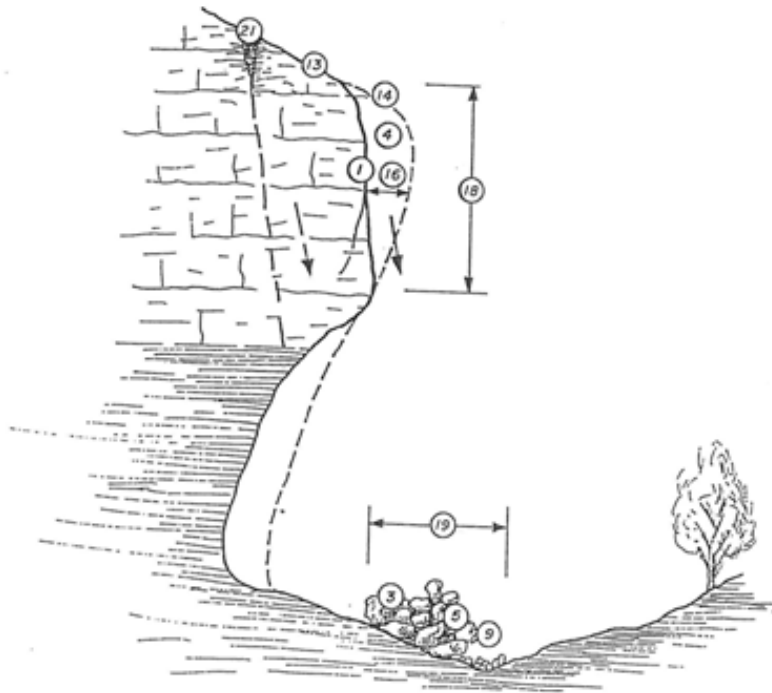
- Los deslizamientos submarinos son comunes y muy extendidos.
- El deslizamiento submarino más espectacular tiene lugar en los flancos de los volcanes submarinos (denominados montes submarinos).

Tema 11. Procesos de ladera

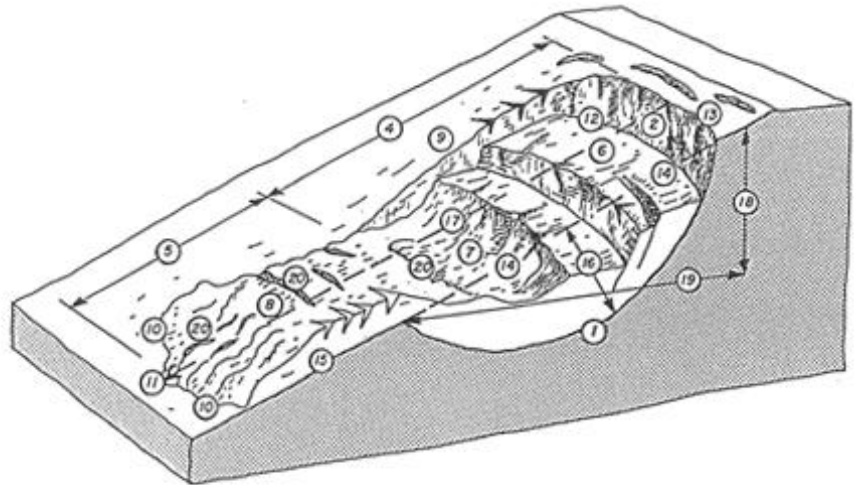
ENGLISH	PORTUGUESE	SPANISH
Rock falls	Desabamento de rocha	Desprendimiento de roca, or Caída (referable to individual blocks)
Debris falls	Desabamento de detritos	Desprendimiento de derrubios
Soil falls	Desabamento de terra	Desprendimiento de suelos
Rock topples	Balançamento de rocha	Vuelco de rocas
Debris topples	Balançamento de detritos	Desplome de derrubios
Soil topples	Balançamento de terra	Desplome de suelos
Single slide	Deslizamento simple (rotacional)	Deslizamiento simple (rotacional)
Multiple slide	Deslizamento múltiplo (rotacional)	Deslizamiento múltiple (rotacional)
Successive slide	Deslizamento sucessivo (rotacional)	Deslizamiento sucesivo (rotacional)
Block slide	Deslizamento en bloco (translacional)	Deslizamiento en bloques (translacional)
Rock slide	Deslizamento de rocha (translacional)	Deslizamiento de roca (translacional)
Debris slide	Deslizamento de detritos (translacional)	Deslizamiento de derrubios (translacional)
Mudslide	Deslizamento de terra (translacional)	Coladas de barro
Rock spreading	Expansão lateral de rocha	Extensión lateral en rocas
Debris spreading	Expansão lateral de detritos	Not applicable
Soil spreading	Expansão lateral de terra	Extensión lateral en suelos (arcillas)
Rock flows	Escoada de rocha	Flujos de rocas
Debris flows	Escoada de detritos	Corriente de derrubios
Mud flows	Escoada de terra	Flujos de barro
Sand flows (dry)	Fluxo de areia (a seco)	Flujos de arena (seco)
Rock fall avalanche	Avalanche de rocha	Alud de rocas
Flow slide	?	Flujo deslizante
Slump-earthflow	Deslizamento rotacional-Escoada de terra	Rotación con flujo de tierras

Nomenclatura y partes de un deslizamiento.

1. Superficie de rotura: superficie a través de la cual tiene lugar el movimiento
2. Escarpe: parte de la superficie de rotura que coincide con la superficie del terreno, constituyendo un resalte topográfico.
3. Material desplazado: masa de material movida hacia fuera de la ladera.
4. Zona de deflación: área dentro de la cual el material desplazado se encuentra por debajo de la superficie original del terreno.
5. Zona de acumulación: área en la que el material desplazado se dispone por encima de la superficie original del terreno.
6. Cabeza: parte superior del material desplazado.
7. Cuerpo principal: material desplazado apoyado sobre la superficie de rotura.
8. Pie: porción de material desplazado que se apoya sobre el terreno original.
9. Flancos: límites laterales del deslizamiento.



Desprendimiento



Deslizamiento rotacional

Nomenclatura y partes de un deslizamiento (continuación)

10. Borde: límite del material desplazado más alejado del escarpe.
11. Punta: punto del borde más alejado del escarpe.
12. Coronación: contacto entre el material desplazado y el escarpe.
13. Cabecera: ladera no movilizada, o escasamente movilizada, adyacente a la parte superior del escarpe.
14. Superficie original del terreno: la existente antes del movimiento.
15. Superficie de separación: limita el material desplazado de la superficie original.
16. Profundidad del movimiento: distancia en perpendicular desde la superficie de rotura y la del terreno.
17. Longitud máxima del movimiento: distancia, medida en el plano de la ladera, entre la punta y la cabecera.
18. Altura del movimiento: distancia vertical entre la cabecera y el pie de la superficie de rotura.

Nomenclatura y partes de un deslizamiento (continuación)

19. Longitud horizontal: distancia vertical entre el pie y la cabecera, medida en una sección longitudinal.
20. Grietas transversales y radiales: aberturas del material desplazado, transversales o subparalelas, respectivamente, a la dirección del desplazamiento.
21. Crestas transversales y longitudinales: abombamientos en la superficie del terreno desplazado, originados por acumulación relativa del material movilizado.

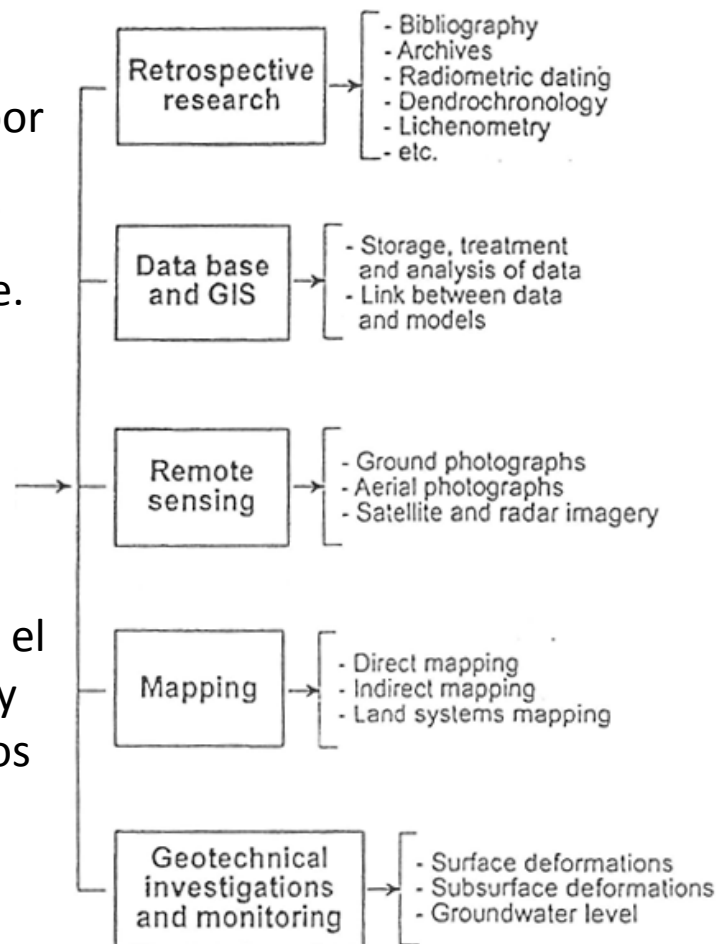
Problemática ingeniería

Existen numerosos ejemplos de problemas causados por los deslizamientos a las obras e infraestructuras humanas, por lo que la **prevención** y/o **mitigación/corrección** de sus efectos es imprescindible.

En relación con la prevención, mitigación y corrección, el primer paso consiste en la **identificación, localización y análisis** de las laderas inestables y de los deslizamientos individuales.

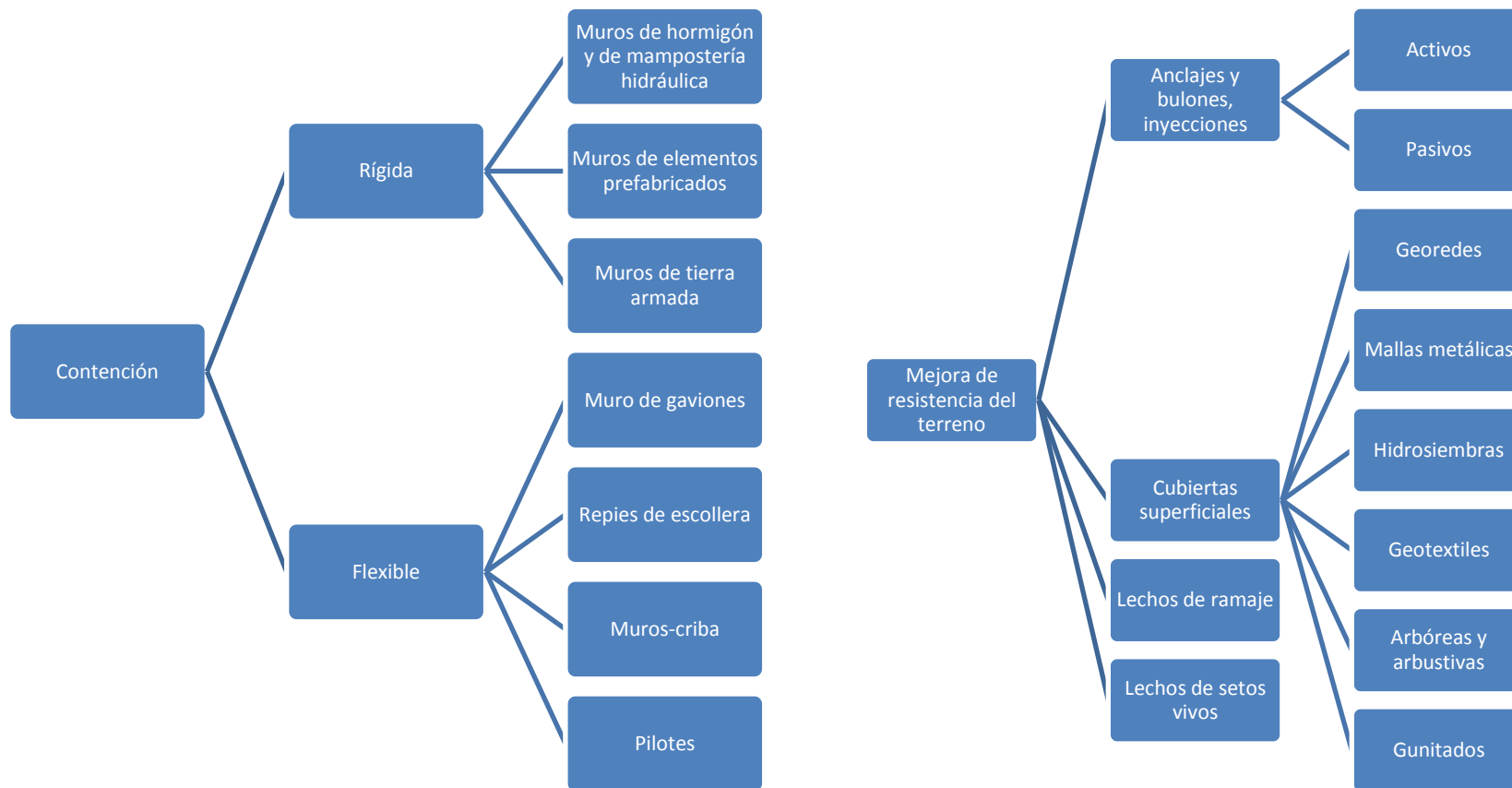
- De cara a lo anterior, existe un protocolo o secuencia de investigación que viene reflejado en la figura.

TECHNIQUES FOR LANDSLIDE INVESTIGATIONS



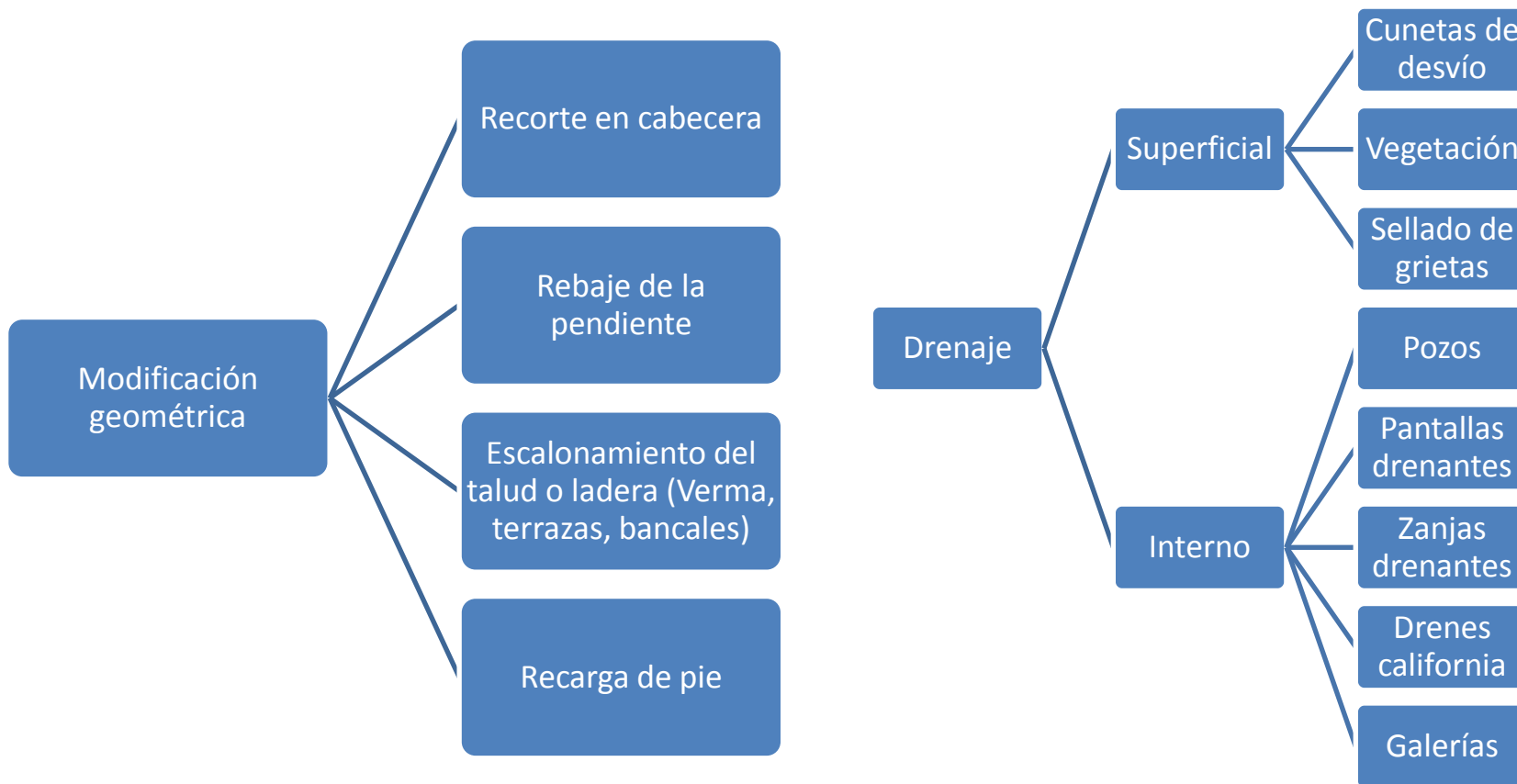
Prevención, mitigación/corrección de deslizamientos

En relación con la prevención, mitigación/corrección se pueden emplear métodos o técnicas muy diversas:



Prevención, mitigación/corrección de deslizamientos

En relación con la prevención, mitigación/corrección se pueden emplear métodos o técnicas muy diversas:



Otros ejemplos

Fig. 5// Jordi Corominas (ed.) (1989).

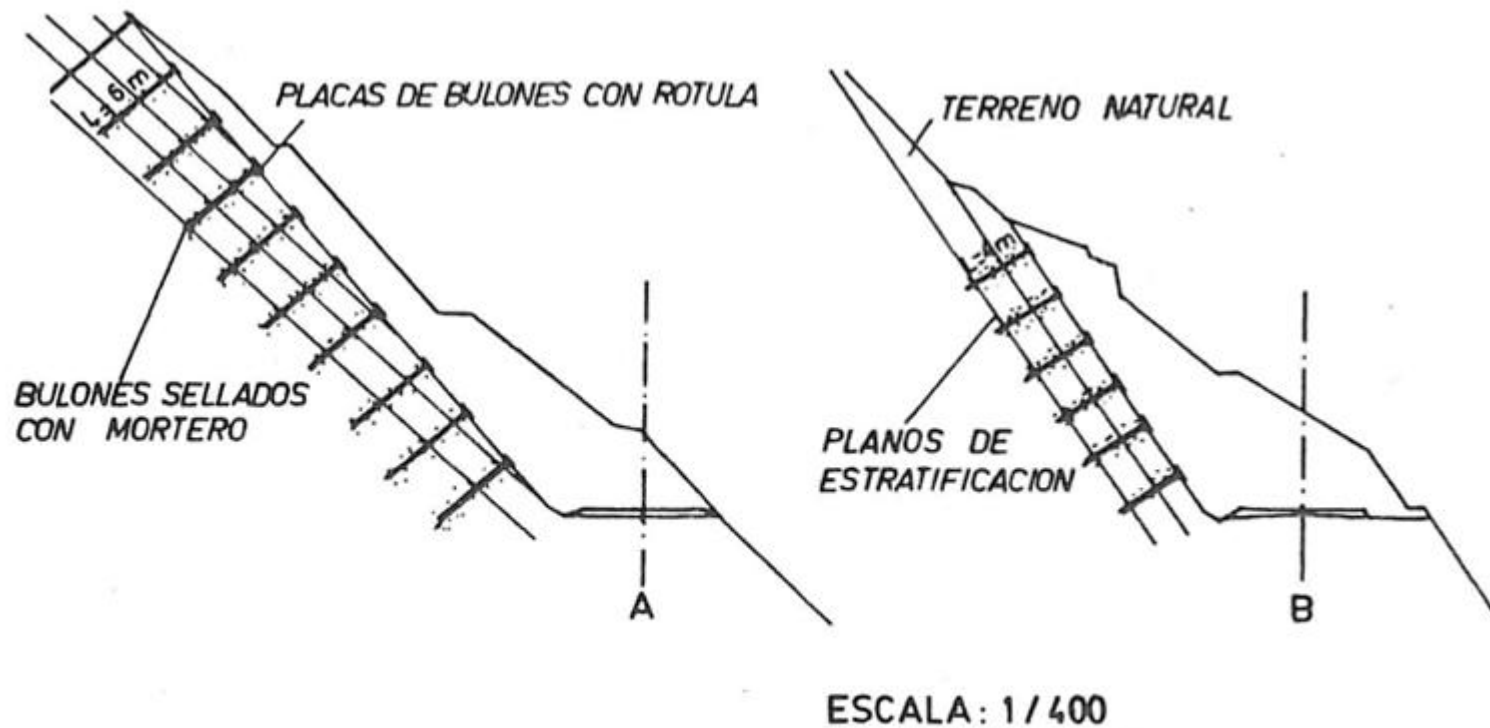


Fig. 5. Estabilización de un desmonte en la variante de Ripoll (Gerona) mediante bulones.

Otros ejemplos

Fig. 8// pp.243. Jordi Corominas (ed.)(1989)

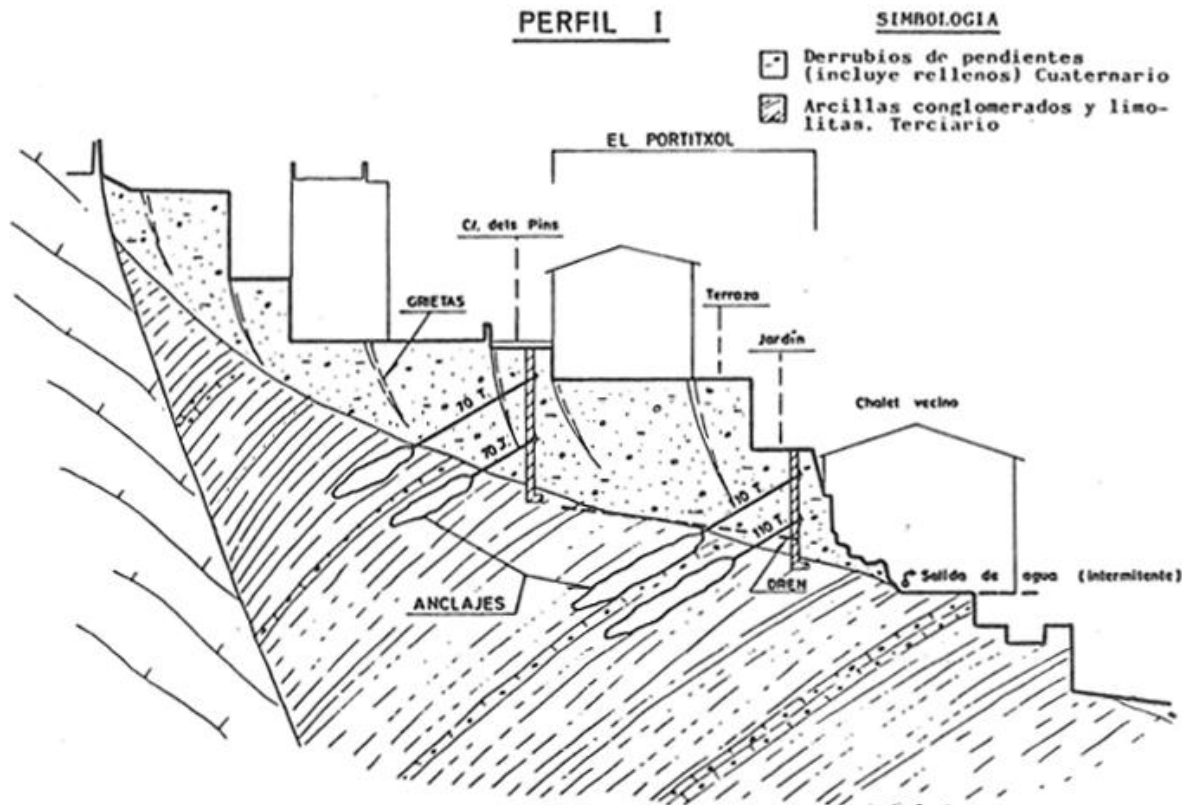


Fig. 8. Estabilización de una ladera en Estarlit (Gerona) mediante muros anclados.

Otros ejemplos

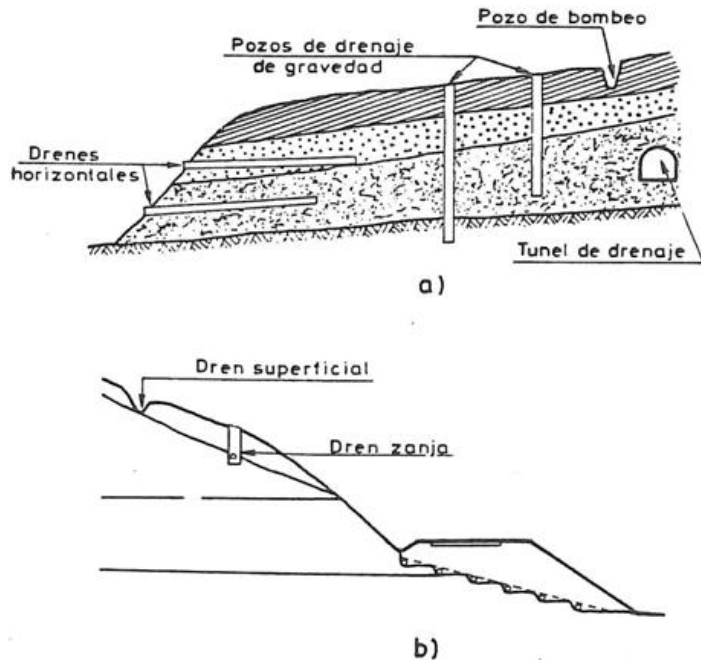


Fig. 9. Medidas de drenaje a) Drenaje profundo b) Drenaje superficial.

Fig. 9 y 10// pp.245. Jordi Corominas (ed.) (1989)

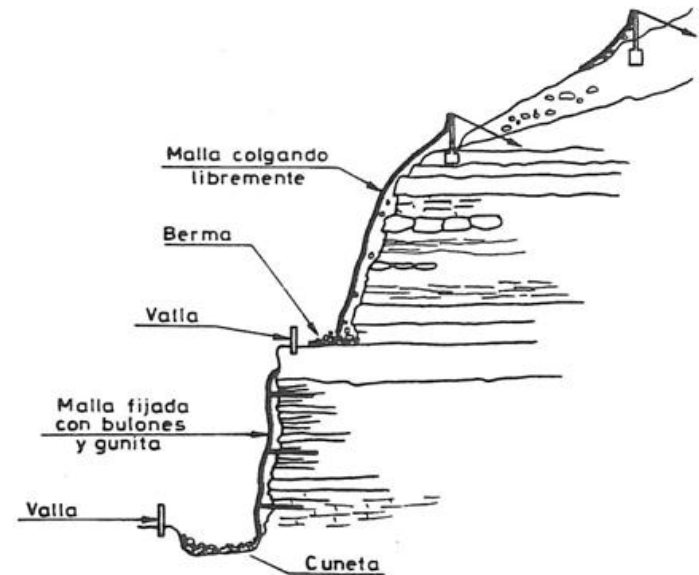


Fig. 10. Estabilización superficial de un talud en roca (según Fookes y Sweeney, 1976)

Ejemplo de mapa de riesgo de deslizamiento

