

Procesos y efectos geológicos en taludes y laderas.

- Introducción.
- Delimitación de conceptos, clasificaciones y aspectos generales de los procesos y efectos en taludes y laderas.
- Condicionantes de contorno en la dinámica de taludes y laderas.
- Estudio de un caso particular de movimiento de terreno.
- Metodologías para el estudio geológico de taludes y laderas.
- La datación de los movimientos en taludes y laderas.
- La Geotecnia en taludes y laderas.
- Detección de movimientos de terreno.
- Los movimientos de taludes y laderas en relación con los trazados de vías de comunicación y de otros servicios, y con las ocupaciones urbanísticas del territorio.
- **Introducción.**

Meteorización, en geología, es el proceso de desintegración física y química de los materiales sólidos en o cerca de la superficie de la Tierra. La meteorización física rompe las rocas sin alterar su composición y la meteorización química descompone las rocas alterando lentamente los minerales que las integran. Ambos procesos se desarrollan conjuntamente y producen desechos que se transportan mecánicamente o en solución como es el caso de la erosión. Los procesos de meteorización también ayudan a la formación del suelo.

La meteorización física resulta, en primer lugar, de los cambios de temperatura, tales como el calor intenso y la acción de congelación del agua en las grietas de las rocas; también influye la acción de algunos organismos vivos como son las raíces de los árboles o algunos animales con sus madrigueras. Los cambios de temperatura expanden y contraen las rocas alternativamente, causando granulación, separación en escamas y una laminación de las capas exteriores. La acción del hielo y el ensanchamiento exponen capas más profundas a la meteorización química.

Este tipo de meteorización altera la composición mineral original de la roca de diferentes maneras: disolviendo minerales en agua y debilitando los ácidos del suelo por oxidación, produciendo una reacción química con el dióxido de carbono y por hidratación, proceso mediante el cual el agua se combina y reacciona químicamente con los minerales. Plantas, como los líquenes, también descomponen determinadas rocas al extraer nutrientes solubles y hierro de sus minerales originales.

Efecto sobre los taludes de la meteorización. Un talud es la inclinación de un terreno o del paramento de un muro, luego los taludes pueden ser considerados como laderas, el de las vías de comunicación en concreto como taludes artificiales y por tanto están afectados por dicha meteorización, nos vamos a centrar en la meteorización física y en las posibles soluciones para evitarla, así como la regeneración de taludes que ya han sido afectados.

En los taludes de carretera los principales causantes del deterioro son la gravedad, los cambios de temperatura, el agua y los elementos biológicos. Estos elementos actúan de forma conjunta, pero para facilitar la comprensión vamos a estudiar su efecto por separado y ver a lo que da lugar cada proceso en particular. A la hora de la verdad son los materiales y el ambiente climático los factores principales que controlan la meteorización, mientras que la topografía del terreno la biosfera y la hidrosfera son agentes que contribuyen a exagerar o suavizar los efectos que marcan esos factores básicos.

Procesos gravitacionales. Al ser la gravedad un campo de fuerza presente en todos los procesos exógenos, se puede decir que es el agente primario. En muchos casos la gravedad participa en el transporte indirectamente:

moviliza determinados cuerpos, por lo general agua líquida o sólida, y éstos pasan a ser los verdaderos agentes, desempeñando el trabajo de mover los materiales.

A veces no existe ese elemento intermedio y es la gravedad la que se encarga de realizar el trabajo por sí sola, propiciando movimientos de autotranslación, en estos casos la gravedad debe considerarse como agente específico.

En los procesos de vertiente se pretende establecer la relación causa efecto entre el nivel de inclinación del terreno y algunos fenómenos. Son procesos que necesariamente necesitan una inclinación del terreno para producirse como por ejemplo caídas o deslizamientos que posteriormente trataremos con mayor detenimiento. Así pues la pendiente del talud es decisiva, ya que los terrenos escarpados favorecen los arrastres, posibilitando que se renueve la superficie expuesta a los agentes meteóricos; sin embargo, dificultan la la concentración de humedad e impiden la estabilidad necesaria para la meteorización química.

Los movimientos de autotranslación tienen en su mayoría un carácter masivo, aunque no siempre es así. Concretamente, la caída de materiales es frecuente que se produzca individualizada o secuencialmente, no de forma masiva.

De acuerdo con todas estas consideraciones y aún reconociendo la limitación terminológica que ello supone, definimos procesos gravitacionales como el desplazamiento en las vertientes sin intervenir ningún soporte activo o medio para movilizarlos, es decir, impulsados por su propio peso.

Principios físicos generales. Como cualquier otro desplazamiento, la autotranslación de materiales en la vertiente queda regulada por todas las fuerzas implicadas, en este caso son el peso, el rozamiento y la cohesión material.

El peso contribuye al impulso, mediante su componente tangencial, y a la resistencia, mediante su componente normal o vertical.

El rozamiento está caracterizado por un coeficiente de rozamiento y un ángulo crítico. El valor del coeficiente de rozamiento depende del tipo de material, de su rugosidad, de la humedad y de la superficie expuesta a contacto.

La cohesión contribuye a la resistencia, es función de las características propias del material: composición, textura, compacidad, cementación... Dichas características pueden ser modificadas por causas extrínsecas que en general no duran mucho, además se pueden producir fenómenos como la presencia de poros, que pueden estar rellenos de agua o aire, el crecimiento de raíces... Estos fenómenos obligan a considerar una cohesión verdadera, la propia de cada material, y otra aparente en función de los condicionantes extrínsecos, pero la que nosotros tenemos que tener en cuenta es la efectiva.

- **Delimitación de conceptos, clasificaciones y aspectos generales de los procesos y efectos en taludes y laderas.**

Se pretenden estudiar las causas y mecanismos que explican las estabilidades e inestabilidades de las vertientes(taludes y laderas). Se aborda, en consecuencia, una parte de los riesgos naturales, que se deberían tener en cuenta en el adecuado usufructo de determinados territorios.

Para ese tratamiento del terreno, se precisa tener muy claros, entre otros, los conceptos límites de:

- aludes(avalanchas),
- desprendimientos, en frentes rocosos,
- deslizamientos, y

- movimientos de flujo.

Entre las situaciones, que describen los anteriores conceptos, puede darse toda una gama de circunstancias mixtas.

Se entiende por **aludes**, avalanchas, de nieve, o de cualquier material, a los movimientos súbitos, a ras del suelo, que pueden soportar sus acumulaciones, cuando:

- forman grandes potencias sobre laderas relativamente escarpadas,
- y alcanzan pendientes de hiper-estabilidad.

En situaciones de hiper-estabilidad, pequeñas perturbaciones físicas(onda acústica, microsismo u otro tipo de vibración en general) producirán desplazamiento de los materiales acumulados, a favor de la gravedad, para que puedan desarrollarse nuevas topografías, con unas pendientes tendentes al equilibrio. En ocasiones, la propia avalancha puede transportar más materiales de los necesarios, para obtener perfiles de equilibrio. Como resultado, aparecerían laderas con pendientes temporales, en hipo-equilibrio, en los sectores de cabecera.

Los **desprendimientos**, en un proceso extremadamente rápido, se corresponden con movimientos de porciones de terreno, rocoso o no, en forma de bloques aislados, o masivamente, siempre que, en una gran parte de sus trayectorias, desciendan por el aire en caída libre, volviendo a entrar en contacto con la topografía, donde se producirán saltos, rebotes y rodaduras.

En los relieves empinados, son frecuentes los desprendimientos distensivos, por falta de apoyo lateral. Se tratarían de desprendimientos relacionados con previas fracturas de distensión. Geomorfológicamente, las grietas de distensión, relativamente abiertas, pero antes del desprendimiento, pueden recibir distintas denominaciones. En algunos lugares de Canarias(Caldera de Taburiente, en la isla de La Palma), se las conocen como **agujeritos**. En este escenario, se llaman **ataúdes** a ciertas cicatrices que dejan los desprendimientos, que presentan peculiares características geométricas.

Los bloques que se desprenden describen **vuelcos** cuando, en las caídas libres, rotan hacia el exterior, alrededor de ejes situados por debajo del centro de gravedad de la masa en movimiento.

Cuando los desprendimientos son muy frecuentes, los derrubios que se forman al pie de la fachada afectada pueden formar acumulaciones potentes. Estos depósitos se llaman **canchales**.

Los desprendimientos suelen clasificarse en los siguientes tipos:

- desprendimiento por gelifracción(desprendimiento favorecido por la acción de cuñas de agua, al helarse, en las grietas existentes en las rocas, y que provocan la propagación de las grietas),
- desprendimiento por reblandecimiento del pie,
- desprendimiento por descalce(por erosión de un material blando del pie, por socavación lateral y/o por deslizamientos basales).

Los **deslizamientos** se definen como desplazamiento de masas de terreno, en estado sólido, por efecto de la gravedad y a favor de niveles de despegue. La masa se desplaza rígidamente, y aunque puede llegar a fragmentarse, se considera que lo hace como un bloque único.

Los niveles de despegues están determinados por capas ricas en arcillas, que actúan como lubricantes cuando aumentan su plasticidad. La pérdida de rigidez sería una consecuencia de la absorción de agua por las arcillas. El agua puede proceder, normalmente, de infiltraciones provenientes de capas superiores más permeables. No se deben descartar aportes de agua por procesos de capilaridad.

Otros niveles de despegue pueden estar formados por fracturas.

A lo largo y ancho de la masa desplazada, es posible que se originen grietas y movimientos de asentamiento.

Los deslizamientos se subclasifican en:

- traslacionales, o
- rotacionales.

según que la superficie de despegue se plana o cóncava, respectivamente.

En los **deslizamientos por rotación**, el giro se efectúa conforme a un eje paralelo a la fachada. En tales casos, los frentes de avance y/o las terrazas de asentamiento, podrían quedar, incluso, a contra-pendiente.

Estructuralmente, los deslizamientos se diferencian en:

- cohesivos(o coherentes), e
- incoherentes.

En los **deslizamientos cohesivos**, la masa desplazada mantiene su estructura original, mientras que en los **incoherentes**, se adquiere una perturbación.

El inicio de un deslizamiento se produce en el momento en que el esfuerzo de cizalla supera al valor de rozamiento interno del material, en una superficie de despegue.

Los **movimientos de flujo** consisten en coladas de materiales:

- que se desplazan a favor de la gravedad,
- de forma continua,
- donde las partículas se pueden desplazar a distintas velocidades, según trayectorias que no tienen que ser, necesariamente, paralelas,
- con régimen laminar, sin descartar excepcionales situaciones de turbulencia,
- y que determinan, a menudo, superficies topográficas lobuladas, a consecuencia de todo lo anterior.

Los materiales susceptibles a formar coladas suelen tener proporciones significativas de limos y arcillas. Muchas coladas presentan niveles inferiores de despegue. En este caso se estaría en una situación mixta entre movimientos de flujo y desplazamientos.

Los movimientos de flujo se pueden clasificar en:

- solifluxión, y
- reptación.

La solifluxión es un movimiento, relativamente rápido, donde toman identidad la presión del agua intersticial y la plasticidad de los materiales.

La solifluxión suele desarrollarse:

- en depósitos de acumulación(coluviones, piedemontes, y otros),
- en depósitos de alteración, sobre todo en formaciones margosas, de esquistos o de pizarras, y
- en formaciones arcillosas y limosas susceptibles a deformarse.

Las coladas de barro son solifluxiones en materiales limo-arcillosos, que dejan cicatrices cóncavas en las áreas de cabecera.

La **reptación** define a movimientos superficiales, extremadamente ralentizados, y prácticamente imperceptibles, salvo después de largos períodos de medida. Estos movimientos suelen ocurrir en unos materiales ricos en arcillas que, con una cierta periodicidad, se embeben de agua. La ralentización puede verse favorecida por una intervención estructural del sustrato (por ejemplo, estratos buzantes a contra-pendiente).

Los **slumping** consisten en ondulaciones, que se producen en las capas de materiales que se desplazan, por procesos de solifluxión-reptación.

Los desprendimientos, deslizamientos y movimientos de flujo inciden, a gran escala, sobre la estabilidad de grandes volúmenes de roca, o de tierras. Suelen desencadenar desplazamientos de grandes magnitudes de masas y provocar efectos catastróficos.

En las zonas volcánicas de los climas húmedos, son muy frecuentes las coladas de barro. Cuando se dan fuertes pendientes, pueden alcanzar velocidades de hasta los 1.000 kilómetros por hora. Un ejemplo reciente se tiene en el Nevado del Ruiz, en Los Andes colombianos, donde:

- entró en juego, además de la actividad volcánica, unos relieves de alta montaña y nieves perpetuas,
- y se puso de manifiesto la extraordinaria rapidez y poder destructivo de las coladas de barro, en zonas montañosas.

Procesos hidrológicos.

Cuando se produce una lluvia, parte del agua caída es absorbida por la vegetación, otra se infiltra en el terreno y otra rellena las irregularidades que se encuentran en el terreno, pequeños huecos que puedan existir.

Si el agua retenida no se evapora y se produce una aportación continuada, se produce una saturación de la tierra y el agua empieza a fluir hacia zonas más bajas, dando lugar a encharcamientos y erosionando la ladera conforme el agua cae, llamándose a esto escorrentía.

El daño producido por la escorrentía dependerá del tipo de material, de la pendiente, de la intensidad de las precipitaciones... Según la importancia del fenómeno podemos distinguir:

- Escorrentía pura: es una lámina de agua cuyo espesor aumenta corriente abajo. En un primer tramo se produce una fuerte erosión, mientras que en su fase final se produce un asentamiento de materiales o sedimentación.
- Escorrentía por exceso de saturación: una vez superado límite de almacenamiento, hay una especie de segregación de las aguas dando lugar a movimientos oblicuos de las mismas, corriendo finalmente por la línea de máxima pendiente.

Los procesos que acabamos de describir se producen cuando la superficie es lisa, situación que se da normalmente en los taludes, pero en zonas donde existen irregularidades, el agua tiende a juntarse formando canalillos que aparecen después de las precipitaciones pero que dejan su huella de forma perenne. Las dos formas principales son:

- Acanaladuras: es la típica hendidura fina que aparece en las laderas que siguen la dirección máxima pendiente y suelen ser paralelas las unas con las otras.
- Cordones o lazos: son similares a lo anterior, pero en este caso algún tipo de obstáculo, como una

piedra, hace que el agua se desvíe dando lugar hilos de flujo entrelazados.

Fenómenos hielo – deshielo.

Las heladas producen tensiones en los materiales debido a la solidificación del agua y a los efectos de contracción – dilatación.

La solidificación del agua afecta principalmente cuando agua en estado líquido, que al introducirse en grietas o hendiduras que puedan existir en los materiales que forman el talud, se solidifica, convirtiéndose en hielo y por tanto aumentando de volumen, lo que produce un efecto palanca, dando lugar a rupturas denominadas gelifracción o crioclastia.

Los fenómenos de dilatación – contracción son debidos a los cambios de temperatura fuertes en poco tiempo, dando lugar a agrietamientos que posteriormente se desarrollan en fracturas, debido al cambio de volumen y de hidratación que sufre la roca.

• Condicionantes de contorno en la dinámica de taludes y laderas.

La condición de contorno básica, en los desprendimientos, es la presencia de frentes rocosos escarpados, como son los taludes. Otros condicionantes serían:

- presencia de discontinuidades(fracturas y fallas de asentamiento, por ejemplo), que faciliten el aislamiento de bloques,
- degradación de la resistencia de la roca, por meteorización,
- acción de los fenómenos de erosión hídrica superficial.

En general, y para el conjunto de la dinámica de taludes y laderas, los condicionantes de contorno serían:

- la pendiente topográfica,
- la potencia del terreno susceptible al movimiento,
- la estratificación,
- la fisuración,
- los movimientos tectónicos que determinen superficies inestables,
- la facilidad del terreno para fracturarse, erosionarse y/o meteorizarse,
- la existencia de niveles de despegue,
- la disponibilidad de agua,
- la presencia y densidad de determinadas comunidades vegetales,
- las actividades humanas que inducen a cambios en el terreno, y
- vibraciones bruscas, que inicien los desplazamientos en situaciones de meta-estabilidad.

La **pendiente topográfica** juega un papel decisivo en tanto que condiciona al valor de la aceleración de la gravedad. Las pendientes críticas de equilibrio serán específicas de cada material y de sus características intrínsecas. Pero, además, para un mismo material con unas características dadas, dependerán de las restantes condiciones de contorno que les afecten.

La **potencia del terreno susceptible al movimiento**. Por mucho que se den las condiciones favorables para el movimiento del terreno, si no hay una masa significativa, los desplazamientos carecerían de importancia o no se darían. De aquí que la **potencia**(espesor de los materiales) constituya un condicionante de contorno.

La **estratificación** condiciona a los posibles movimientos en cuanto representa un factor favorable, o no, a los desplazamientos. Una inclinación de los estratos a contra-pendiente favorece la estaticidad, todo lo contrario de lo que ocurre con un buzamiento en el sentido de la pendiente topográfica.

El grado de elasticidad, o de movilidad, que propicia la disposición estratigráfica dependerá del grado de inclinación y de la rigidez de los estratos. Así, con estratos a contra-pendiente y rígidos, a mayor ángulo de inclinación habría un mayor impedimento al desplazamiento.

La **fisuración** rompe la continuidad del material, con lo que se obtienen elementos libres para el desplazamiento.

En determinadas situaciones, el resultado puede ser diferente en función del material que pueda rellenar las fisuras. Si un material arcilloso rellena fisuras a favor de la superficie topográfica, y si el resto de los condicionantes son favorables, se crearían niveles de despegue, con todas sus consecuencias. En tanto que si las fisuras se rellenan de material de precipitación que cemento, se contrarrestan los procesos tendentes a movimientos de terreno.

En terrenos susceptibles a moverse, los niveles de despegue están constituidos, normalmente, por capas de materiales arcillosos. Estos niveles aumentarán el carácter de lubricante cuando se impregnen de agua. La meteorización podría constituir un mecanismo que proporciona suficientes materiales arcillosos, para originar estos niveles de despegue.

En algunas ocasiones, el papel lubricante de los niveles de arcillas lo desempeñan capas gráficas, sobre todo, en algunos relieves metamórficos.

La **disponibilidad de agua** va a intervenir en la formación de arroyadas y en infiltraciones. La arroyada colabora con el movimiento de arrastre superficial, en tanto que la infiltración participa en el aumento de la plasticidad del terreno, y en el incremento del carácter lubricante de los niveles de despegue.

En los deslizamientos, el agua actúa:

- incrementando el peso de la masa potencialmente deslizante,
- y disminuyendo el coeficiente de rozamiento interno, en la superficie de despegue.

De esta manera, los deslizamientos, y los movimientos en general, toman mayor relevancia y frecuencia durante las épocas de lluvia.

La **vegetación**.

- Por una parte, desacelera el movimiento en cuanto que atrapa y fija las partículas del suelo,
- y, por otra, facilita el movimiento al permitir una mejor infiltración del agua, si la hay, con lo que ello supone.

En relación con la vegetación, y en dependencia con el control de los procesos y efectos de los movimientos en taludes y laderas, se deben destacar las especies que facilitan, por las características de sus raíces, el atrapamiento y fijación de las partículas y la infiltración del agua.

No solamente basta que las raíces sean o no apropiadas para unos procesos y efectos determinados, sino que intervengan en una densidad adecuada, y esto lo determina la abundancia de las comunidades en cuestión.

Pero además, puede ocurrir que la vegetación favorezca una lluvia horizontal (sea el caso del bosque de laurisilva, en las Islas Canarias). En tal supuesto, habría una potencialización de la disponibilidad de agua, que se infiltraría por las raíces y/o a través de una fisuración, con sus posibles efectos en la dinámica del terreno.

Las **vibraciones bruscas de arranque** se pueden deber a:

- la caída de un gran bloque rocoso,
- la actividad volcánica, o
- a una tectónica activa, con terremotos asociados.

La confluencia de condicionantes de contorno no suele propiciar repercusiones en proporciones aritméticas, sino geométricas. Por otra parte, no se debe perder de vista la teoría matemática del caos, en cuanto que una ligera intervención de uno de los condicionantes puede producir un efecto de grandes magnitudes, si el sistema(aquí el terreno) se encontraba en alta meta-estabilidad, por acumulaciones de dosis sucesivas de los diferentes condicionantes de contorno descritos o por describir.

• Estudio de un caso particular de movimiento de terreno.

Sea el Campo de Piedras de Arteara, en el Sur de la isla de Gran Canaria(España). Aquí se pueden cartografiar extensos pedregales. El depósito sedimentario está formado, básicamente, por grandes bloques angulosos, muchos de ellos métricos.

Se presentan tres afloramientos, aunque el principal se encuentra al Oeste de la carretera de Fataga, con una amplitud próxima al kilómetro, y una longitud de varios kilómetros. Todos ellos se localizan a media ladera y al pie de relieves muy abruptos, constituidos por coladas lávicas, entre otras piroclásticas, de naturaleza fonolítica, densamente fracturadas. Sobresale la grosera fracturación vertical.

Una posible explicación del origen de estos depósitos, sobre todo en relación con el más extenso, se podría buscar:

- en susceptibilidad a la formación de grandes bloques, por causas estructurales(fracturaciones verticales y horizontales, por contracciones térmicas, en las coladas),
- y en súbitos desprendimientos de las masas de bloques.

Los desprendimientos serían la respuesta a una convergencia de factores favorables:

- presencia de potentes masas de bloques,
- pendientes muy abruptas, como soportes de las masas de bloques, que rebasaran el perfil de equilibrio, respecto al movimiento de éstos,
- agentes que provocaran el movimiento repentino de los bloques,
- etc.

El inicio de los movimientos de los bloques estaría motivado por sacudidas sísmicas, determinadas por puntuales fallas de asentamiento.

Los pequeños afloramientos se habrían desarrollado por procesos de simpatía, en rocas que permiten, fácilmente, la formación y el desprendimiento de bloques de grandes dimensiones.

La identificación de una de estas fallas, en un barranco próximo, en el de Tirajana, a la altura de la Fortaleza del Ansite, verifica la hipótesis formulada, en cuanto a la causa desencadenante.

De todas maneras, aquí se descarta un origen por cambios bruscos de la temperatura, conforme con la climatología que se da en este sector.

El Campo de Piedras de Arteara encierra un contenido etnográfico, que debió ser preservado. En este entorno, los pre-hispánicos construyeron una necrópolis. En la actualidad, se encuentra expoliada.

• Metodologías para el estudio geológico de taludes y laderas.

En general, metodologías actualizadas, para el estudio de inestabilidades en taludes y laderas, se encuentran desarrolladas y/o recogidas, entre otros, por Ferrer y Gallego(1996) y Luzi y Pergalani(1996).

Las metodologías se suelen basar en:

- En la caracterización, a gran escala, de zonas afectadas por movimientos de laderas, donde se incluyen los aspectos morfológicos y geomorfológicos, y los diferentes factores que influyen y condicionan el comportamiento del terreno.
- En la caracterización meteorológica del lugar.
- En estudios técnicos de detalle, mediante sondeos, calicatas, ensayos de laboratorio, investigaciones in situ, etc.
- En la recopilación de la información previa de la zona de estudio y en las dataciones de paleomovimientos, que hayan tenido lugar.
- En el empleo de técnicas probabilísticas.
- En las cartografías morfodinámicas y en los Sistemas de Información Geográfica.

En la caracterización de la zona de estudio, a partir de una propuesta de Ferrer y Gallego(1996), se deberían cumplimentar fichas, que incluyan los siguientes apartados y datos:

- Situación y localización:

- Estado o Provincia. Municipio. Paraje. Carretera.
- Ubicación. Hoja 50.000(o a otra escala). Coordenadas.
- Usos del suelo afectado.

- Geometría del talud o ladera:

- Descripción generalizada del escenario.
- Altitud(cotas de cima y pie). Diferencia de cotas.
- Ángulo natural de la ladera.
- Exposición.
- Situación del deslizamiento en la ladera.
- Observaciones complementarias.

- Geometría del deslizamiento:

- Cotas de la cabecera y el pie. Desnivel del deslizamiento.
- Anchura, longitud, extensión y volumen.
- Situación y profundidad de grietas de tracción.
- Anchura de los escarpes originados en los deslizamientos(de las cicatrices).
- Tipo de rotura.
- Profundidad de la superficie de rotura.
- Morfología del depósito.
- Observaciones complementarias.

- Caracterizaciones geológicas del deslizamiento:

- Litologías. Formación. Edad.
- Condiciones de las rocas y/o del suelo. Estructuras continuas y discontinuas(grado de fracturación).
- Grado de meteorización.
- Humedad.
- Observaciones complementarias.

- Condiciones hidrogeológicas:
 - Área de la cuenca de aportes.
 - Flujo de agua en el área de deslizamiento.
 - Posición del nivel freático en la zona.
 - Fuentes y manantiales.
 - Comportamiento hidrogeológico de los materiales.
 - Condiciones de drenaje.
- Análisis del proceso:
 - Actividad.
 - Fecha de los movimientos.
 - Mecanismos de rotura.
 - Velocidad.
 - Causas.
 - Condiciones de contorno.
 - Análisis de estabilidad.
 - Observaciones complementarias.

Las anteriores fichas llevarán anexas:

- esquemas de situación,
- planta y corte de los deslizamientos, y
- fotografías.

Para la obtención de datos meteorológicos, principalmente de precipitaciones, para sus análisis y correlaciones con los episodios de movimientos de taludes y laderas, se ha de recurrir a estaciones meteorológicas locales, las más cercanas posibles a la zona de estudio.

En el supuesto de que las estaciones estén distantes, se harán las correspondientes extrapolaciones, tras las oportunas correlaciones de tomas de datos in situ. En cualquier caso, se deberán considerar series temporales significativas de datos. En el caso de la Meteorología, una serie abarcará, como mínimo, unos siete años de toma continua de datos.

Las cartografías morfodinámicas y los Sistemas de Información Geográfica recogerán, entre otras cosas, los distintos comportamientos dinámicos inventariados, con sus identificaciones y descripciones. De esta manera, se dispondría de una herramienta muy válida, para la sectorización de usos en un territorio, que abarcará vertientes. Se podrán predecir distintos grados de riesgos, en función de diferentes usos. En esta línea, se encuentran diferentes autores, tales como Brabb(1996) y Remondo et al.(1996).

Desde la representación de la información de inestabilidades reales y potenciales, en mapas, Remondo et al.(1996) obtienen **índices de inestabilidad**, que necesariamente estarán en dependencia con descriptores e indicadores de vulnerabilidad, como los definen Martínez, Casas y Gómez(1996), en este caso en relación con taludes y laderas. Estos índices se tendrán que tener presentes en los usos del territorio.

• La datación de los movimientos en taludes y laderas.

En palabras de Corominas y Moya(1996), Mediante las técnicas de datación se puede cuantificar los ritmos en la modificación del relieve y analizar si estos son constantes o, por el contrario, variables. Para estos autores, la datación de los grandes movimientos permitirán analizar las eventuales relaciones de éstos con:

- los mecanismos desencadenantes, y
- las reactivaciones sucesivas.

En principio, la datación de los movimientos de taludes y de laderas es un problema difícil. Sobre todo, los recientes. Los deslizamientos, en tiempos geológicos, se datan muchas veces por la edad de los materiales situados por debajo y por encima.

La datación de movimientos recientes es posible:

- cuando afectan a parte de masas boscosas naturales o de repoblación, o a turberas,
- cuando fosilizan o contienen elementos datables (suelos, arbustos o árboles bien conservados),
- con el estudio de nucleidos cosmogénicos en las cicatrices de cabecera, y
- si afectan a obras civiles.

En relación con las masas, boscosas se pueden identificar:

- la cicatriz de despegue que deja el movimiento,
- cuándo se produce, si el movimiento es rápido,
- y si acontece más de uno, cuando estén lo suficientemente separados en el tiempo.

Los troncos de los árboles afectados por el movimiento, adquirirán una inclinación, mientras que los no afectados mantendrán la verticalidad. El límite entre estos dos tipos de troncos marcará la cicatriz de despegue.

Después del movimiento, los árboles desplazados presentarán dos tramos en sus troncos, el existente previo al desplazamiento, que mantendrá la inclinación, y el de crecimiento posterior, que recuperará la verticalidad. La metodología de datación consistirá en restar a la edad que resulta del estudio de los anillos del tronco (dendrocronología), la edad que otorguen los anillos de una rama que esté inmediatamente por encima de la zona de inflexión del tronco.

En el caso de que sea un movimiento único y rápido, dirá cuándo ocurrió éste. Si se trata de un movimiento muy lento, que llegue hasta la actualidad, traducirá el momento en que se inició.

Los árboles indeformados, que crezcan sobre el material movilizado, darán una edad mínima del movimiento. También se puede determinar esta edad mínima con el análisis de turberas, que se desarrollan en encharcamientos dependientes con ondulaciones del terreno, y siempre que sean debidas a los desplazamientos, o a la rotación de la cabecera del deslizamiento.

Para las dataciones de los elementos fosilizados (suelos, arbustos y árboles, entre otros), por los materiales desplazados, o contenidos en éstos, se pueden aplicar técnicas radiométricas (^{14}C), si los eventos han tenido lugar dentro de un determinado rango de tiempo, que permita la aplicación del método.

De acuerdo con Lang y Dikau (1996), en las cicatrices de los nuevos escarpes, y en las caras de los grandes bloques que se desgajan y acumulan, aparecen nucleidos cosmogénicos in situ. Por ejemplo, el ^{36}Cl , que se produce por reacciones de desintegración de ^{39}K y del ^{40}Ca , así como por activación del ^{35}Ca . Los ritmos de acumulación son proporcionales a la intensidad de los rayos cósmicos y a la concentración de nucleidos presentes en el material, y todo esto está en función de la antigüedad de la superficie de la cicatriz.

Con respecto a la recopilación de la información histórica, sobre los movimientos antiguos ocurridos en una zona, a veces se detecta la falta generalizada de documentación, a pesar de la gran cantidad de posibles fuentes a revisar. Se puede encontrar información en los organismos de investigación en el ámbito nacional, en las hemerotecas, en los archivos parroquiales y municipales de las localidades afectadas, etc. Normalmente,

la información histórica disponible resulta pobre, en cuanto a los datos técnicos sobre los movimientos, a no ser que hayan provocados casos de sucesos graves.

- **La Geotecnia en taludes y laderas.**

Un estudio de Geotecnia pretende:

- conocer las condiciones de partida de un terreno, antes de soportar proyecto de Ingeniería,
- y/o proponer soluciones técnicas (obras complementarias), que puedan atenuar, o anular, los riesgos, entre ellos los de inestabilidades, derivados de impactos producidos por otras obras.

Para cada caso puede haber soluciones aceptables o, en última instancia, se optaría por abandonar el proyecto, si éste no es viable, a la vista de los estudios de Geotecnia.

En un estudio de Geotecnia, se tendrían que abordar, entre otras cosas:

- las propiedades y los ensayos de suelos y rocas,
- los análisis específicas de litologías inestables,
- la auscultación de taludes y laderas inestables,
- la identificación y descripción de superficies potenciales de despegue,
- las identificaciones y cuantificaciones de arcillas sensibles a los cambios de humedad,
- las estimaciones de almacenamientos anómalos de agua, por una obra determinada,
- la medición de la estabilidad de taludes, y
- la aplicación de métodos generales, en la determinación de equilibrios libres.

Con todo, se podría reseñar que en una Ingeniería Civil, toma especial interés, dentro de un contexto de inestabilidades:

- el control de movimientos,
- la corrección de taludes inestables, y
- la construcción de taludes, bien mediante un sistema mecánico de excavación, o bien por explosivos, sin rechazar técnicas intermedias, como puede ser, por ejemplo, la prevoladura.

Las técnicas más usuales, en la estabilización de terrenos, o en la mitigación de sus movimientos, se basan en la utilización de:

- anclajes especiales, que traten de aumentar el rozamiento interno del terreno,
- pilotes pasivos,
- sustentaciones de base (empalizadas de madera o muros de cemento),
- pantallas, o fachadas, de cemento, en toda la superficie de los frentes rocosos,
- recubrimientos con repoblación vegetal, o con mallas, y
- drenajes, que mantengan el nivel de humedad lo más bajo posible.

Los pilotes pasivos consisten en la introducción de estructuras rígidas en el terreno, con el fin:

- de aumentar sus características de resistencia, y
- de disminuir sus deformaciones.

Los efectos, en relación con la reducción de la inestabilidad, pueden ser, en la realidad, muy diferentes, según los casos. Esto explica la diversidad de metodologías, al respecto, en la Ingeniería Civil.

Los pilotes soportan unos esfuerzos, inducidos por el talud, o ladera. Tales esfuerzos, de acuerdo con

Grau(1987), se clasifican en:

- axiales: a lo largo de los fustes,
- cortantes: esfuerzos de flujo, entre pilotes, pero sin rebasar el anterior límite de rotura.

Y dependen, fundamentalmente:

- de las características del terreno, sobre todo de sus parámetros de resistencia,
- de las situaciones de los pilotes en el terreno,
- de las inclinaciones de los pilotes, y
- de las distancias de separación entre los pilotes.

Grau(1987) estudia minuciosamente las relaciones entre:

- pilotes y esfuerzos axiales,
- pilotes y esfuerzos cortantes, y
- pilotes y esfuerzos de flexión.

Y presta especial atención a las siguientes situaciones:

- Cuando los pilotes se hincan a través de una capa de arcilla blanda, hasta llegar a una capa de alta capacidad portante(arena, grava u otros materiales).
- Cuando los pilotes son cortos, y no llegan hasta el terreno firme.
- Y cuando los pilotes toman cargas axiales, simultáneamente, a través de sus cabezas, bajo rellenos, y sus fustes.

Existen diversas fórmulas para evaluar las fuerzas laterales, producidas en un talud o ladera, en una fila de pilotes. Sea, por ejemplo, la expresión de Tomo Ito(1981).

Determinadas las fuerzas que actúan sobre los pilotes pasivos, los cálculos de los coeficientes de seguridad, frente a los deslizamientos, pueden hacerse por cualquiera de los métodos habituales, que recoge Grau(1987).

• **Detección de movimientos de terreno.**

Se puede extrapolar, con las debidas modificaciones, una metodología sísmica, como la que desarrolla Sabot et al.(1996), respecto a las avalanchas de nieve, en los Pirineos catalanes, en la detección precoz de los movimientos de terreno, sobre todo si implican la caída de grandes fragmentos de rocas, en una zona de inestabilidades de taludes y laderas, usufructuada por el hombre.

Con una detección precoz de movimientos de terreno, se podrían tomar medidas preventivas:

- que evitasen pérdidas en vidas humanas, y/o
- que amortiguasen los efectos catastróficos en bienes.

En principio, la interpretación de las señales sísmicas, desde una toma automática de señales, permitiría la caracterización de los movimientos del terreno. Según Sabot et. al.(1996), el análisis de datos consistiría en una correlación de los registros de las señales, de los movimientos de terreno, con los datos de las condiciones de contorno, a fin de eliminar las señales procedentes de otros fenómenos.

La discriminación, entre las señales, y la eliminación de los ruidos de fondo, se obtendrían gracias a los diferentes métodos de análisis temporal y espectral.

El análisis de las ondas S, P y superficiales, que se crearían en las deformaciones del terreno, determinaría la procedencia de las señales y, por consiguiente, los canales del movimiento, donde ocurrieran los fenómenos.

En realidad, esta metodología se encuentra en una fase experimental, donde se requiere realizar desencadenamientos artificiales de los procesos y efectos, con registros simultáneos:

- de señales sísmicas, y
- de imágenes(a través de videos, por ejemplo).

• Los movimientos de taludes y laderas en relación con los trazados de vías de comunicación y de otros servicios, y con las ocupaciones urbanísticas del territorio.

A la hora de diseñar y construir carreteras, autopistas túneles, galerías, presas y gaseoductos, y de levantar tendidos eléctricos de alta tensión, entre otras obras de infraestructura, así como de ocupar urbanísticamente unos terrenos, es sumamente necesario conocer el comportamiento del terreno, en relación con sus movimientos(deslizamientos, desprendimientos y movimientos de flujo), aparte de otras dinámicas geológicas, que pueden representar grandes riesgos naturales(sea el caso de los movimientos sísmicos).

A menudo, en la construcción de vías de comunicación, se excavan taludes artificiales, que desestabilizan a las vertientes. Pero la necesidad de disponer de unas vías rápidas de comunicación es una demanda de una sociedad en desarrollo. Los problemas de inestabilidades se pretenden resolver con una Ingeniería Moderna.

Dentro del escenario venezolano, un mal uso del terreno, en cuanto al trazado de carreteras, con unas tecnologías de protección deficientes, se encuentra en el Estado Miranda y en el Distrito Federal. Se intervienen terrenos inestables que, por añadidura, encierran fuertes riesgos sísmicos, en el trazado de carreteras.

En este entorno, la inestabilidad del terreno hay que buscarla en tres condiciones de contorno predominantes:

- las fuertes pendientes topográficas,
- las quebradas que se desarrollan en el relieve, y
- las características litológicas de los materiales ocupados.

Se parte de relieves muy apropiados para desarrollar movimientos. Gran parte de la Geología Regional del entorno de Caracas está constituida por rocas metamórficas densamente foliadas y fisuradas, de naturaleza esquistosa-filítica, donde abundan el grafito y minerales de arcilla como cloritas y moscovitas. Estas composiciones mineralógicas dan carácter lubricante al desplazamiento de las rocas, a favor de las superficies de foliación. Las fisuraciones facilitan el arranque de las láminas de deslizamiento. De esta manera, el conjunto goza de una gran inestabilidad.

Pero estos materiales, ya de por sí inestables, han sufrido una meteorización intensa, por las condiciones ambientales a las que se encuentran sometidas a lo largo de los tiempos geológicos recientes(abundante presencia de agua como elemento de procesos de hidrólisis, y temperaturas elevadas que potencian las reacciones químicas). El producto final de la meteorización es el aumento de los minerales de arcilla disponibles, que hacen incrementar el carácter lubricante de la roca.

Por último, hay relieves que son acumulaciones de arrastre de los anteriores materiales, por las aguas superficiales. En estos depósitos, es lógico esperar la existencia de niveles arcillosos, que actúen como niveles de despegue.

Esto explica que la carretera general hacia oriente, tenga un tramo de alta vulnerabilidad y que soporte frecuentes cierres temporales por movimientos reales, o ante eventuales peligros de movimientos de tierra,

que ocupen la carretera, o que hagan que la propia carretera se desplace. Un tramo sumamente sensible sería el que queda delimitado entre Guatire – Caucagua – El Guapo.

En lo que respecta al desarrollo urbano de un territorio, en los ámbitos de las laderas, dentro de este entorno geográfico, se deben tener en cuenta:

- si se ocupa parte del alcantarillado de la Naturaleza, y/o
- las características dinámicas del suelo.

Cualquiera de las circunstancias anteriores, potenciadas por la presencia de aguas arroyadas y de las procedentes de las quebradas, excitan, por sí solas, el alto riesgo de siniestralidad ante su ocupación urbanística, sobre todo si se trata de viviendas precarias, sin ningún tipo de garantías técnicas en su construcción, y si el suelo sobre el que se edifica describe pendientes topográficas críticas.

No suelen ser excepcionales las catástrofes, en víctimas humanas, que acontecen en barrios de chabolas(ranchitos o favelas), edificados en laderas inestables, de las grandes ciudades latinoamericanas. Normalmente, tales catástrofes están ligadas a las fuertes lluvias que acompañan a ondas tropicales, o a colas de huracanes.

Un ejemplo cercano se tiene en la ciudad de Caracas(Venezuela). Con el paso de la cola del Huracán Bret, en torno al 7 de agosto de 1993, fue cuantioso el número de pérdidas humanas y de habitáculos, en algunos barrios periféricos, levantados sobre laderas inestables, y en las quebradas que los atraviesan. A estas pérdidas, hay que añadirles una repotenciación de los problemas sanitarios, con los serios riesgos de epidemias. En realidad, en estos espacios urbanos inhumanos, las condiciones sanitarias precarias son una constante.

De nuevo, se deduce la necesidad de disponer de una cartografía morfodinámica, pero sobre todo un sistema SIG, que permita delimitar zonas de riesgos, para determinados usos y actividades del hombre.

Un plan de restauración contendrá:

Información detallada sobre el lugar previsto para la repoblación.

Descripción del medio, con referencia a la geología, hidrografía, climatología, superficie vegetal, paisaje y demás elementos que permiten definir la configuración del medio.

Definición del medio socio económico, que incluye la relación de usos y aprovechamientos preexistentes, en su caso aplicables a la zona.

Planos y documentación relativos a los aspectos contemplados en los párrafos anteriores.

Medidas previstas para la restauración del espacio natural afectado, conteniendo las siguientes especificaciones:

Condicionamiento de la superficie del terreno, ya sea vegetal o de otro tipo.

Medidas para evitar la posible erosión.

Protección del paisaje.

Estudio del impacto ambiental de la explotación sobre los recursos naturales de la zona y medidas previstas para su protección.

El plan de restauración contendrá asimismo el calendario de ejecución y coste estimado de los trabajos de restauración.

Procesos y efectos geológicos en taludes y laderas.

TOPOGRAFÍA APLICADA A LA INGENIERÍA CIVIL