

Proyecto MACASTAB

Bases para la elaboración de una
Guía metodológica para la gestión del riesgo natural de inestabilidad
de laderas y taludes de naturaleza volcánica en la Macaronesia



ÍNDICE DEL PROYECTO MACASTAB

Introducción.....	6
1. Factores influyentes en el equilibrio de taludes y laderas.....	8
1.1. Factores condicionantes.....	8
1.2. Factores desencadenantes.....	18
2. Tipos de inestabilidad.....	33
2.1. Desprendimientos o caídas de rocas:.....	35
2.2. Avalanchas rocosas.....	37
2.3. Deslizamientos.....	38
2.4. Flujos o coladas:.....	40
3. Diagnóstico previo	43
3.1. Toma de datos sobre un suceso ya producido.....	43
3.2. El índice de susceptibilidad ISTV.....	43
3.3. Evaluación rápida de las condiciones de estabilidad en suelos.....	47
3.4. Ficha de campo para análisis de estabilidad en suelos.....	50
3.5. Valores característicos de cohesión y fricción interna en suelos volcánicos. .	53
3.6. Franjas de afección en coronación y a pie de talud.....	55
3.7. Consideraciones finales.....	60

4.	Estudio geológico y geotécnico.....	61
4.1.	Información previa y antecedentes:.....	62
4.2.	Trabajos de campo:.....	63
4.3.	Contenido del informe geológico y geotécnico:.....	64
5.	Análisis de riesgos por desprendimiento.....	68
5.1.	Zonas de tránsito.....	69
5.2.	Zonas de permanencia.....	70
6.	Gestión del riesgo.....	76
6.1.	Análisis de alternativas de sistemas de protección:.....	76
6.2.	Tipos de medidas.....	77
6.3.	Diseño de medidas de protección frente a caída de rocas.....	78
6.4.	Riesgo residual.....	79
6.5.	Criterios de aceptabilidad del riesgo.....	80
6.6.	Justificación de la solución recomendada.....	82
7.	Relación entre el cambio climático y la incidencia de los movimientos de ladera..	83
7.1.	Introducción:.....	83
7.2.	Incidencia del cambio climático.....	84
7.3.	Mitigación de los efectos del cambio climático.....	87

ANEJOS

Anejo I. Unidades Geotécnicas.....	89
Anejo II. Índice ISTV.....	109
Anejo III. Metodo de Evaluación Rápida de Estabilidad en Suelos.....	126
Anejo IV. Clasificación Geomecánica VSR	132
Anejo V. IRTV.....	138
Anejo VI. VRHRS.....	147
Anejo VII. Medidas de control y protección:.....	163
Anejo VIII. Metodología de diseño de medidas de protección de caída de rocas	189
Referencias bibliográficas:.....	197

INTRODUCCIÓN.

Los movimientos de ladera son fenómenos que constituyen uno de los riesgos naturales más importantes que afectan a la región de la Macaronesia. En ellos intervienen un gran número de factores propios de los archipiélagos de origen volcánico que es preciso identificar, caracterizar y ponderar para abordar con éxito la problemática que plantean y reducir el riesgo que entrañan para la sociedad.

El proyecto MACASTAB establece unas bases técnicas comunes para los cuatro archipiélagos a partir de las cuales se podrán elaborar en cada región guías metodológicas específicas, adaptadas a las condiciones técnicas, sociales, administrativas y políticas de cada territorio, que establezcan procedimientos a seguir para facilitar la gestión del riesgo.

En este documento se pueden encontrar herramientas y procedimientos orientados a diagnosticar las inestabilidades de las laderas y taludes volcánicos existentes en la región. También se ofrecen pautas para seleccionar la solución más conveniente en cada caso. Siguiendo sus recomendaciones y aplicando sus herramientas se podrá realizar una mejor gestión del riesgo asociado a sus posibles efectos.

Los procedimientos descritos en esta Guía no tienen como objeto el diseño de taludes y solamente son de aplicación a los ya existentes.

El proyecto ha sido cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional – FEDER a través del Programa de Cooperación INTERREG V-A España-Portugal MAC (Madeira-Azores-Canarias) 2014-2020, por la Viceconsejería de Infraestructuras y Transportes del Gobierno de Canarias que actuó como jefe de filas, por el Laboratorio Regional de Ingeniería Civil de la Región Autónoma de Madeira, por el Laboratorio Regional de Ingeniería Civil de la Región Autónoma de Azores y por la Universidad de Cabo Verde.

Para llevarlo a cabo se ha configurado un equipo técnico constituido por técnicos con experiencia en esta actividad conocedores de las circunstancias y la problemática que supone la gestión de este tipo de riesgos, los cuales, pertenecen a las siguientes entidades:

CANARIAS

Luis González de Vallejo (INVOLCÁN)

Ana Miranda Hardisson (INVOLCAN)

Sergio Leyva Campos (CABILDO DE TENERIFE)

Luis Hernández Gutiérrez (VICECONSEJ DE INFRAESTRUCTURAS Y TRANSPORTES)

Javier Jubera Pérez (VICECONSEJERÍA DE INFRAESTRUCTURAS Y TRANSPORTES)

MADEIRA

Jose Fernando Vieira de Sousa (LREC REGIÓN AUTÓNOMA DE MADEIRA)

Joao Pernaut (LREC REGIÓN AUTÓNOMA DE MADEIRA)

AZORES

Paulo Alexandre Pimentel Amaral (LREC REGIÓN AUTÓNOMA DE AZORES)

Ana Maria M. A. P. Malheiro (LREC REGIÓN AUTÓNOMA DE AZORES)

Luis Teixeira (LREC REGIÓN AUTÓNOMA DE AZORES)

CABO VERDE

Sonia Silvia Victória (UNIVERSIDAD DE CABO VERDE)

Alexandra Delgado (UNIVERSIDAD DE CABO VERDE)

CAPÍTULO 1. Factores influyentes en el equilibrio de taludes y laderas.

En la mayoría de los casos son varias las causas que contribuyen al movimiento de una ladera. Aunque con frecuencia se atribuye el suceso a la acción de algún factor desencadenante de la rotura del terreno, las inestabilidades no se hubieran producido de no existir una serie de condiciones predeterminadas que favorecen el fenómeno. El conocimiento de todos estos factores permite un correcto análisis del talud, la evaluación de su estado de estabilidad y, en caso de que sea necesario, el diseño de las medidas para evitar o estabilizar los movimientos.

Por lo tanto, para diagnosticar el estado de una ladera o un talud se debe comenzar por estudiar los factores que condicionan su estado de equilibrio y los factores que, en un momento dado, podrían desencadenar su inestabilidad.

1.1. Factores condicionantes.

Los factores condicionantes son intrínsecos a los materiales. Su identificación y evaluación es necesaria para caracterizar las condiciones del medio geológico en el que se emplaza un talud o ladera.

En los suelos la litología, estratigrafía y las condiciones hidrogeológicas determinan las propiedades resistentes y el comportamiento del talud. En el caso de macizos rocosos el principal factor condicionante es la estructura geológica, es decir, la disposición y frecuencia de las discontinuidades y la intensidad de fracturación.

La presencia de estos factores y su combinación puede dar lugar a movimientos de materiales en los taludes y laderas, condicionando además sus mecanismos de rotura (*ver capítulo 2*). Dentro de los factores condicionantes, las propiedades físicas y resistentes de los materiales, íntimamente relacionadas con la litología, y las características morfológicas y geométricas de la ladera son fundamentales para la predisposición a la inestabilidad. En el siguiente cuadro se resumen los factores condicionantes y sus efectos sobre la estabilidad:

Cuadro 1.1. Influencia de los factores condicionantes en las condiciones de los materiales y en la estabilidad de laderas y taludes.

Factores condicionantes		Efectos
a) Factores Geomorfológicos	Topografía y relieve	Afecta a las condiciones de equilibrio
	Procesos de erosión y erosión diferencial	Provoca pérdidas de resistencia y modificación del estado tensional
b) Factores Geológicos	Litología	Condiciona el comportamiento mecánico e hidrogeológico
	Estratigrafía	Comportamiento discontinuo y heterogéneo
	Estructura geológica	Resistencia, deformabilidad Comportamiento discontinuo y anisótropo Zonas de debilidad
	Discontinuidades	Comportamiento anisótropo Planos preferenciales de rotura Condicionan la dirección de movimiento y tamaño de bloques
	Procesos de meteorización y alteración geoquímica	Reducción de las propiedades resistentes
	Propiedades geomecánicas de los materiales	Disminución de la resistencia a la rotura
c) Factores hidrogeológicos y climáticos	Hidrogeología	Provoca presiones intersticiales y erosión interna
	Meteorología y clima	Modifica el contenido en agua del terreno y las propiedades y resistencia de los materiales

a) Factores geomorfológicos.

Topografía y relieve

El relieve juega un papel definitivo en cuanto a que es necesaria cierta pendiente para que se produzcan los movimientos gravitacionales en masa.

- La relación espacial entre la pendiente y los planos de discontinuidad de las masas de suelo o de los macizos rocosos determina las condiciones de estabilidad de estos planos y define la posibilidad o no de que se den movimientos. Éstos se podrán generar siempre

que los planos de discontinuidad “afloren” en la ladera o en la cara del talud, es decir, siempre que presenten un buzamiento hacia la pendiente y menor que la pendiente.

- Junto con la litología y/o la estructura geológica, la pendiente determina el tipo de movimientos; por ejemplo, los flujos pueden generarse en suelos arcillosos con pendientes muy bajas, en ocasiones no superiores a 10° - 11° mientras que las avalanchas rocosas se generan en materiales rocosos con pendientes abruptas.
- Junto con los planos de discontinuidad, la pendiente define el volumen y el peso de los bloques que pueden romper y deslizar.
- Determina los procesos de escorrentía y erosión superficial.



Figura 1.1. En los archipiélagos de la Macaronesia, se pueden observar con cierta frecuencia taludes con pendientes subverticales (Isla de Madeira).

Los desprendimientos de bloques rocosos son más frecuentes y extendidos en las zonas montañosas y escarpadas, y en barrancos encajados con paredes verticales, de las que pueden desprenderse bloques, previamente independizados por discontinuidades, o por acción de la erosión diferencial en los niveles más blandos.

Las Islas Macaronésicas, debido a su relieve abrupto y al carácter volcánico de los materiales que las forman, con coladas fracturadas y depósitos de piroclastos que generan laderas muy escarpadas, son especialmente propensas a la ocurrencia de

desprendimientos de bloques.

Procesos de erosión y erosión diferencial

La erosión o socavación del pie de las laderas, escarpes y acantilados, por erosión fluvial, litoral u otra causa, da lugar a la pérdida de resistencia en la zona afectada y a la modificación de su estado tensional, lo que unido a la falta de apoyo del material suprayacente puede provocar la inestabilidad y la generación de deslizamientos o desprendimientos.

Las laderas costeras sometidas a la acción de las mareas y al oleaje son zonas, en general, con riesgo de inestabilidad. Merecen destacarse los procesos que se desarrollan en acantilados rocosos, que dan lugar al retroceso de los mismos. Las inestabilidades pueden estar ligadas a temporales marítimos, especialmente si coinciden con mareas vivas.

La erosión diferencial se produce cuando existen capas compuestas de materiales con distinta resistencia a la erosión, en las que cada material se ve afectado a un ritmo distinto.



Figura 1.2. Formación de cornisas en coladas basálticas "aa" por erosión diferencial de los niveles de escorias, frente a los compactos basáltico más resistentes (Isla de El Hierro, Canarias).

La erosión también puede ser interna, debida a diferentes factores, con los mismos efectos sobre la estabilidad de la ladera. Los procesos de formación y hundimiento de cavidades subterráneas asociadas a la presencia de determinados tipos de materiales pueden desencadenar inestabilidades, sobre todo si existen materiales blandos y alterables.

b) Factores geológicos.

Litología y estratigrafía

La litología, es decir, el tipo de material que forma un talud, está relacionada con el tipo de inestabilidad que puede ocurrir, teniendo las diferentes litologías distinto grado de susceptibilidad potencial ante la ocurrencia de deslizamientos o roturas (*ver capítulo 3*). Las propiedades físicas y resistentes de cada tipo de material, junto con la presencia de agua, gobiernan su comportamiento mecánico. Aspectos como la alternancia de diferentes materiales, competencia y grado de alteración, o la presencia de capas de material blando, controlan los tipos y la disposición de las superficies de rotura, que tienden a orientarse, por las zonas superiores de roca alterada, o por zonas de suelos más o menos homogéneos. En los macizos rocosos, la existencia de capas o estratos de diferente competencia implica también un diferente grado de fracturación en los materiales, lo que complica la caracterización y el comportamiento del talud.



Figura 1.3. Alternancia de materiales de distinta competencia y erosión diferencial (Isla de Madeira).

Estructura geológica

La estructura geológica juega un papel definitivo en las condiciones de estabilidad de los taludes rocosos. La combinación de los elementos estructurales con los parámetros geométricos del talud, altura e inclinación, y con su orientación, determinan los problemas de estabilidad que se pueden presentar.

La estructura del macizo rocoso queda definida por la distribución espacial de sus familias de discontinuidades, que individualizan bloques de matriz rocosa que se mantienen unidos entre sí por las características y propiedades resistentes de las discontinuidades.

La estructura geológica, junto con la estratigrafía y la litología, determinan la potencialidad de movimientos en los diferentes tipos de materiales rocosos y suelos, y la existencia de planos de discontinuidad que pueden actuar como superficies de rotura. En los macizos rocosos con estructura geológica compleja, fallados y fracturados, con zonas de alteración, etc., serán estas condiciones las que predominen sobre la litología.

Discontinuidades: fallas, discordancias y diaclasas

La presencia de discontinuidades o “planos de debilidad” en los macizos rocosos, como son las superficies de estratificación, las diaclasas, las fallas, etc., buzando hacia el frente del talud supone la existencia de planos de rotura y deslizamiento potenciales, y su orientación y disposición condiciona los tipos, modelos y mecanismos de inestabilidad.

Un macizo fracturado o con discontinuidades presenta un comportamiento anisótropo, y unos planos preferenciales de rotura. Por ejemplo, un determinado sistema de fracturas condicionará tanto la dirección de movimiento como el tamaño de los bloques a deslizar, o la presencia de una falla buzando hacia el talud limitará la zona inestable y condicionará el mecanismo de rotura. Los cambios y singularidades estructurales, como zonas tectonizadas o de cizalla, cambios bruscos en el buzamiento de los estratos, etc., implican una heterogeneidad estructural que puede condicionar las zonas de rotura.



Figura 1.4. Macizo rocoso basáltico con disyunción columnar que facilita la caída de bloques por vuelco. (Isla de Madeira).

Otro aspecto importante es la relación entre las dimensiones del frente del talud y la red de discontinuidades; en función de esta relación, el comportamiento del talud quedará definido por una o unas pocas macro-discontinuidades (referidas a la escala del talud) o bien por varios sistemas de juntas y otros planos de debilidad con un entramado denso, condicionando el tipo y el volumen de las inestabilidades.

Procesos de meteorización y alteración geoquímica

En determinados tipos de suelos o macizos rocosos blandos, los procesos de meteorización juegan un papel importante en la reducción de sus propiedades resistentes, dando lugar a una alteración y degradación intensas si estos materiales son expuestos a las condiciones ambientales como consecuencia, por ejemplo, de una excavación. Esta pérdida de resistencia puede dar lugar a la caída del material superficial y, si afecta a zonas críticas del talud, como su pie, puede generar roturas generales, sobre todo en condiciones de presencia de agua.

La meteorización, es decir, la desintegración y/o descomposición de los materiales geológicos en superficie por alteraciones de carácter físico o químico, modifica las características y propiedades físicas y mecánicas de los materiales. Los materiales

rocosos meteorizados pueden ser definidos, en una amplia acepción, como aquellos que se encuentran en la transición entre roca y suelo, presentando un amplio rango de propiedades geotécnicas y características mixtas de los suelos y de las rocas según el grado de meteorización.

Este proceso está condicionado por las condiciones climáticas, la temperatura y la humedad así como el régimen de precipitaciones y de vientos, que determinan el tipo y la intensidad de las transformaciones físicas y químicas que afectan a los materiales rocosos en superficie. Dependiendo de las características climáticas de una zona predominarán unas acciones u otras: en climas fríos o de alta montaña, con precipitaciones medias, predomina la meteorización física controlada básicamente por el hielo, mientras que en climas tropicales cálidos, con precipitaciones abundantes, las acciones químicas son las predominantes.



Figura 1.5. Meteorización físico-mecánica en disyunción esferoidal. (Cabo Verde).

La meteorización química da lugar a la descomposición de las rocas y a los cambios mineralógicos mientras que la física rompe y disgrega la roca, debilitando la estructura rocosa al romperse los minerales y los contactos entre partículas, aumentando la superficie expuesta a la atmósfera y permitiendo la entrada de agua. La acción y los efectos de la meteorización son distintos dependiendo del tipo de roca, estando directamente

relacionados con su composición mineralógica.

Propiedades geomecánicas de los materiales.

Las propiedades físicas y resistentes de los materiales y de las posibles superficies potenciales de rotura determinan la resistencia que debe ser vencida para llegar a la rotura, la cual depende de los parámetros resistentes del material, su cohesión y fricción.

Los suelos en general, por su carácter isótropo, presentan menor complejidad en el estudio de su resistencia y comportamiento, mientras que en los macizos rocosos, que pueden presentar muy diferente grado de fracturación y modelos de distribución de las discontinuidades, intervienen tanto las propiedades de la matriz rocosa como las de las discontinuidades. Generalmente, en rocas blandas como las rocas arcillosas, margas, yesos, etc. juegan un papel muy importante las propiedades resistentes de la matriz rocosa, mientras que en el caso de macizos rocosos formados por rocas duras y resistentes las propiedades de las discontinuidades son las que gobiernan y controlan la estabilidad del talud. El que la rotura se produzca a través de los bloques de roca o a favor de planos de discontinuidad depende, a su vez, de las propiedades de ambos ámbitos y de sus relaciones geométricas, como su tamaño y distribución relativos.

c) Factores hidrogeológicos.

El agua, cuando se encuentra presente en el terreno, juega un papel fundamental en la estabilidad de laderas y taludes ya que altera las propiedades físicas y químicas de los suelos y las rocas mediante procesos de erosión y meteorización físico-química de los materiales. Los efectos más importantes del agua en las propiedades del terreno son:

- Reducción de la resistencia al corte de los planos y discontinuidades al disminuir la presión efectiva.
- Aumento de las fuerzas que tienden al deslizamiento en grietas de tracción, particularmente importante en taludes.
- Erosión interna por flujo sub-superficial o subterráneo.
- Meteorización y cambios en la composición mineralógica de los materiales.
- Apertura de discontinuidades por hielo-deshielo, específico en zonas de alta montaña.

El control del agua subterránea es un sistema efectivo para la estabilización de los deslizamientos profundos de gran magnitud cuyo desencadenamiento no está relacionado con fenómenos meteorológicos estacionales, sino que obedece a condiciones climáticas a

largo plazo, debido a que los regímenes de precipitación y condiciones de humedad son capaces de modificar de forma sustancial los niveles freáticos y el contenido en agua del terreno. El mecanismo principal que contribuye a la inestabilidad es la elevación del nivel freático por la infiltración neta de agua, desempeñando el aumento del peso específico del terreno un papel secundario. Las presiones intersticiales que actúan en el interior de un talud se pueden conocer directamente mediante la utilización de piezómetros.



Figura 1.6. Efectos del factor hidrogeológico sobre un acantilado (Isla de Madeira).

La infiltración del agua de lluvia produce flujos sub-superficiales y subterráneos en las laderas, el aumento del contenido en agua de la zona no saturada, por encima del nivel freático, y la elevación del nivel freático, recargando la zona saturada.

La cantidad de agua que se infiltra al terreno depende de diversos factores, además de la intensidad y duración de las lluvias, como son el tamaño de la cuenca de aporte, el contenido previo de agua en el terreno (que viene definido por la posición previa del nivel freático y por el grado de saturación), su permeabilidad y transmisividad. Dependiendo de estos factores, se generan estados de desequilibrio que pueden dar lugar a la inestabilidad

de las laderas.

1.2. Factores desencadenantes.

Los factores desencadenantes son factores externos que modifican las propiedades o condiciones iniciales de los materiales de las laderas y taludes, de forma que generan un incremento de los esfuerzos de corte o una reducción de la capacidad resistente a éste en determinadas zonas o en los planos potenciales de rotura, mediante acciones como:

- aplicación de sobrecargas estáticas.
- aplicación de cargas dinámicas;
- cambios en las condiciones hidrogeológicas;
- modificación de la geometría, provocando la pérdida de equilibrio entre las fuerzas que actúan sobre las laderas o taludes.

Los factores desencadenantes más frecuentes e importantes son los que se muestran a continuación en el siguiente cuadro:

Cuadro 1.2. Influencia de los diferentes factores desencadenantes en las condiciones de los materiales y en la estabilidad de laderas y taludes.

Factores desencadenantes		Efectos
a) Fenómenos meteorológicos	Precipitaciones intensas	Modifican las condiciones hidrogeológicas y aumentan las presiones intersticiales
	Temporales de mar y viento	Erosión, cambios en los niveles de agua y agrietamiento de las cabeceras de taludes
b) Sismicidad	Sismicidad tectónica	Cambios en la distribución de cargas y estado de esfuerzos
	Sismicidad volcánica	
c) Acciones bioantrópicas	Excavaciones y rellenos	Varían los perfiles de equilibrio Modifican las condiciones hidrogeológicas Cambian la distribución de cargas y estado de esfuerzos
	Vibraciones	Modifican el estado de las fuerzas o esfuerzos de la ladera
	Obras en la red de drenaje	Cambian las condiciones hidrológicas

a) Fenómenos meteorológicos.

El riesgo de deslizamientos o caídas de rocas en taludes, se incrementa en gran medida al producirse fenómenos meteorológicos adversos como pueden ser tormentas, borrascas y temporales marítimos que traen consigo altos niveles de precipitación, oleaje en la costa y rachas de viento que pueden llegar a desequilibrar las fuerzas que actúan sobre las laderas y taludes provocando su rotura.

Tanto, las precipitaciones como el régimen climático influyen en la estabilidad del terreno al modificar su contenido de agua, por lo que debe considerarse la respuesta del mismo ante:

- Precipitaciones intensas durante horas o días (tormentas, borrascas y temporales).
- Variaciones estacionales (paso de épocas secas a lluviosas a lo largo del año).
- Ciclos plurianuales (alternancia de periodos prolongados de sequía y ciclos húmedos).

En general, cuanto menos permeables sean los materiales, menor será la influencia de las precipitaciones cortas y mayor la del régimen climático y las condiciones plurianuales, anuales o estacionales.

Otro tipo de acciones relacionadas con el clima son los procesos de hielo-deshielo que provocan la pérdida de resistencia de los suelos y pueden dar lugar a inestabilidades superficiales (solifluxiones) en laderas de suelos de zonas frías, y a desprendimientos en macizos rocosos, donde el hielo provoca la fracturación y meteorización del material. En las islas macaronésicas estos procesos están condicionados por su altitud.

Precipitaciones intensas

No obstante, podemos considerar que la lluvia es el factor que más influencia ejerce sobre las pérdidas de equilibrio de taludes en las islas de la Macaronesia debido a que la mayoría de estos sucesos ocurren después de lluvias intensas o durante periodos lluviosos.

El efecto del agua superficial producto de las precipitaciones (escorrentía), puede causar problemas importantes de estabilidad al crearse fuertes presiones en las discontinuidades y grietas por las que se introduce. Además en la zona más superficial del terreno, puede provocar el arrancamiento y arrastre de materiales de la superficie de la ladera o talud.

Las precipitaciones intensas durante horas o días modifican las condiciones

hidrogeológicas y los niveles de agua, y pueden desencadenar movimientos superficiales, como deslizamientos y flujos de barro o derrubios, que afectan a materiales alterados y a suelos, y desprendimientos de bloques rocosos previamente independizados del macizo, siendo frecuentes también las reactivaciones de antiguos deslizamientos.



Figura 1.7. Desprendimiento en la isla de San Miguel (Açores) después de un episodio de precipitaciones.

La rápida infiltración del agua de lluvia, saturando el terreno superficial e incrementando las presiones intersticiales, explica la generación de los movimientos. La falta de vegetación en las laderas, la presencia de materiales sueltos o poco consolidados y la existencia previa de roturas e inestabilidades juegan un papel fundamental por la mayor capacidad de infiltración y movilización de los materiales. El riesgo debido a estos procesos está asociado principalmente a su ocurrencia repentina y a la intensidad horaria o diaria de la precipitación. Para el caso de desprendimientos y deslizamientos de suelos superficiales es un dato importante que adopta un papel protagonista en el desencadenamiento de las inestabilidades.

En el archipiélago de las Azores, Marques y col. (2015) llevaron a cabo un estudio estadístico de los casos de movimientos de ladera entre los años 1900 y 2008 en la isla de São Miguel, asociándolos con sus mecanismos de activación. En ese trabajo, los

autores concluyeron que los eventos desencadenados por la precipitación fueron considerablemente superiores a los demás factores desencadenantes considerados (Figura 1.8). Desde la década de los 80, se ha constatado un aumento en el número de eventos, que puede ser explicado, en parte, por una mayor atención prestada a este tema por los medios de comunicación, pero también por la ocurrencia de grandes inestabilidades meteorológicas verificadas en 1986, 1996 y 1997, que originaron importantes deslizamientos y coladas detríticas.

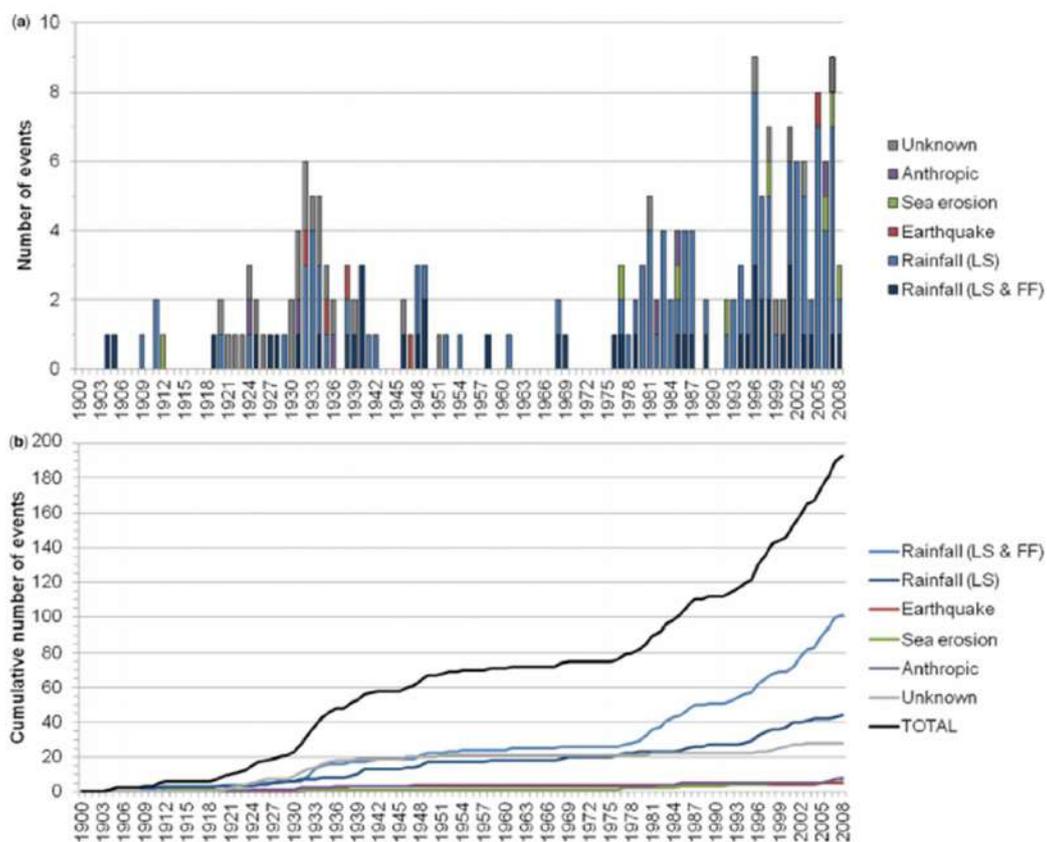


Figura 1.8. Distribución temporal de movimientos destructivos en la isla de San Miguel entre 1900 y 2008, teniendo en cuenta el factor desencadenante: (a) frecuencia anual; (b) frecuencia acumulativa. LS, deslizamiento; FF, colada (Adaptado de Marques et al., 2015).

Como parte del proyecto MACASTAB, se han realizado dos estudios específicos que relacionan los eventos de inestabilidad ocurridos con los niveles de precipitación con los que se relacionan. El primero se llevó a cabo en la isla de San Miguel, en Azores, en la que las inestabilidades suelen desarrollarse predominantemente en forma de deslizamientos de suelos y el segundo en la isla de Tenerife, en Canarias, donde

predominan los desprendimientos de rocas. Sobre la base de este estudio, es posible estimar un valor cuantitativo de una precipitación umbral a partir del cual es relevante la probabilidad de ocurrencia de fenómenos de inestabilidad.

La gráfica siguiente contrasta la cantidad de eventos de inestabilidades de taludes registradas por el Cabildo Insular de Tenerife en su red insular de carreteras entre el 1 de agosto de 2010 y el 30 de mayo de 2016 con los niveles de precipitación mensuales durante ese periodo pudiéndose observar la estrecha relación que existe entre el nivel de precipitaciones y la cantidad de eventos registrados.

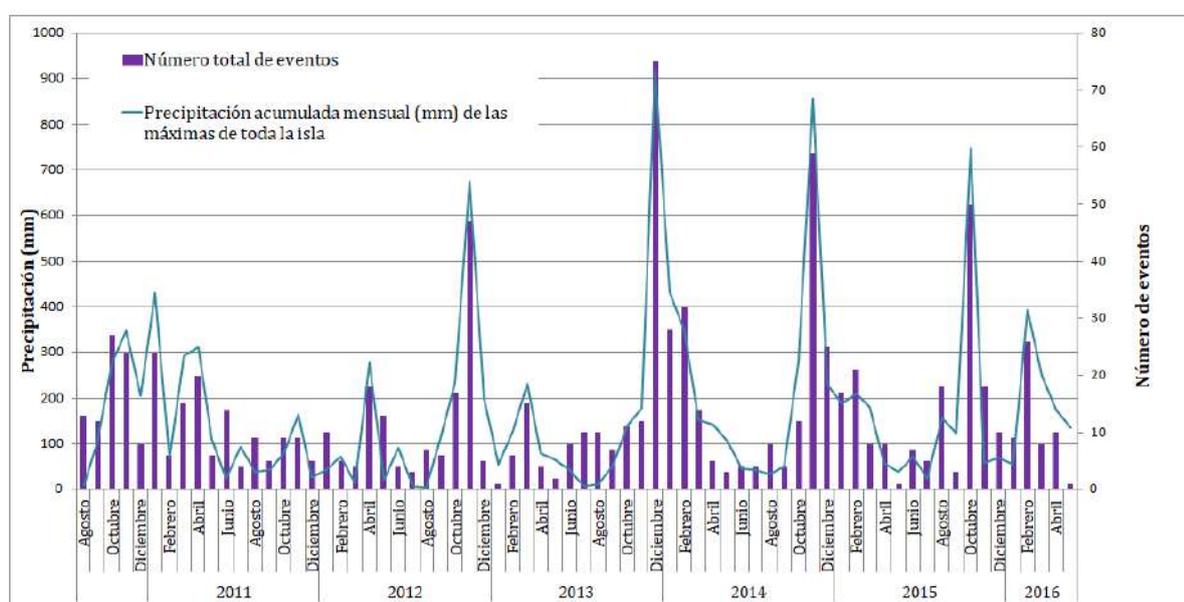


Figura 1.9. Influencia de la precipitación mensual con la cantidad de inestabilidades producidas. La línea azul representa la precipitación acumulada mensual y las barras la cantidad de sucesos producidos en ese mes.

Para realizar el estudio de Azores, se emplearon datos de precipitación que fueron proporcionados por la Dirección Regional del Medio Ambiente, utilizando datos de todas las estaciones instaladas en la isla de São Miguel desde 2012 hasta finales de 2018. Los registros de ocurrencia fueron obtenidos por el Servicio Regional de Protección Civil y Bomberos de las Azores (SRPCBA), informes internos de LREC-Açores y noticias de periódicos. Los datos empleados son posteriores a 2012 debido a que a partir de ese año se produjo un incremento de las estaciones meteorológicas con registro continuo lo que permitió relacionar mejor la fecha de inestabilidad con la precipitación que ocurrió en el día,

y por lo tanto determinar mejor la probabilidad de ocurrencia.

Los intervalos de precipitación considerados son los que se indican en la tabla 1.1. Muestran el número total de días con precipitación incluida en los intervalos de precipitación, p , el número de días con eventos de inestabilidad en ese intervalo, el número total de eventos y la probabilidad del evento.

ESTUDO EFETUADO ENTRE OS ANOS DE 2012 E 2018										
INTERVALOS DE PRECIPITAÇÃO	Días com precipitação no intervalo		Días sem instabilidades (ñi)		Días com instabilidades		INSTABILIDADES			
							Totais (i)	P evento $\frac{\sum(i + \tilde{n}i)}{i / \sum(i + \tilde{n}i)}$		
= 0 mm	56	(2,19 %)	55	(98,21 %)	1	(1,79 %)	3	(0,24 %)	58	5,17 %
0 < p <= 20	1964	(76,81 %)	1934	(98,47 %)	30	(1,53 %)	44	(3,52 %)	1978	2,22 %
20 < p <= 40	336	(13,14 %)	321	(95,54 %)	15	(4,46 %)	40	(3,2 %)	361	11,08 %
40 < p <= 75	143	(5,59 %)	114	(79,72 %)	29	(20,28 %)	212	(16,97 %)	326	65,03 %
75 < p <= 125	42	(1,64 %)	7	(16,67 %)	35	(83,33 %)	432	(34,59 %)	439	98,41 %
P > 125	16	(0,63 %)	0	(0 %)	16	(100 %)	518	(41,47 %)	518	100 %
TOTAL	P = 0	56	(2,19 %)	55	(2,26 %)	1	(0,79 %)	3	(0,24 %)	
	P > 0	2501	(97,81 %)	2376	(97,74 %)	125	(99,21 %)	1246	(99,76 %)	
TOTAIS	p	2557		2431	(95,07 %)	126	(4,93 %)	1249		
	p máx (mm)	289,2								

Tabla 1.1. Resumen de los datos procesados para el estudio realizado a nivel de la isla de São Miguel en el período comprendido entre 2012 y 2018.

En base a esta recopilación de información, se encontró que en 2.557 días analizados solo en 56 no había registro de precipitación.

Como se puede ver en la Tabla 1.1, en ese día en el que no se produjo precipitación, se registraron tres eventos de inestabilidad, que eventualmente pudieron haber tenido otro mecanismo desencadenante, lo cual representa el 0.24% de los eventos que ocurrieron. Aunque en el intervalo de $p = 0$ mm hubo 3 eventos, no hay, en el estudio, 4 días sucesivos sin la existencia de precipitación.

El tratamiento de los datos permitió elaborar el gráfico de la figura 1.10 en el que es posible estimar la probabilidad de que ocurra una inestabilidad en función de la precipitación producida en ese mismo día. Como se puede ver, a partir de 60 mm de precipitación diaria, se obtiene una probabilidad cercana al 70% de que se produzca una inestabilidad.

Marques y col. (2010) desarrollaron funciones para expresar umbrales de precipitación responsables de desencadenar fenómenos de inestabilidad. En el estudio realizado por estos autores, la función $BFI(D) = 65.34 D^{-0.4813}$ corresponde al ambiente de discriminación entre episodios de inestabilidad geomorfológica y días en que no hubo inestabilidad.

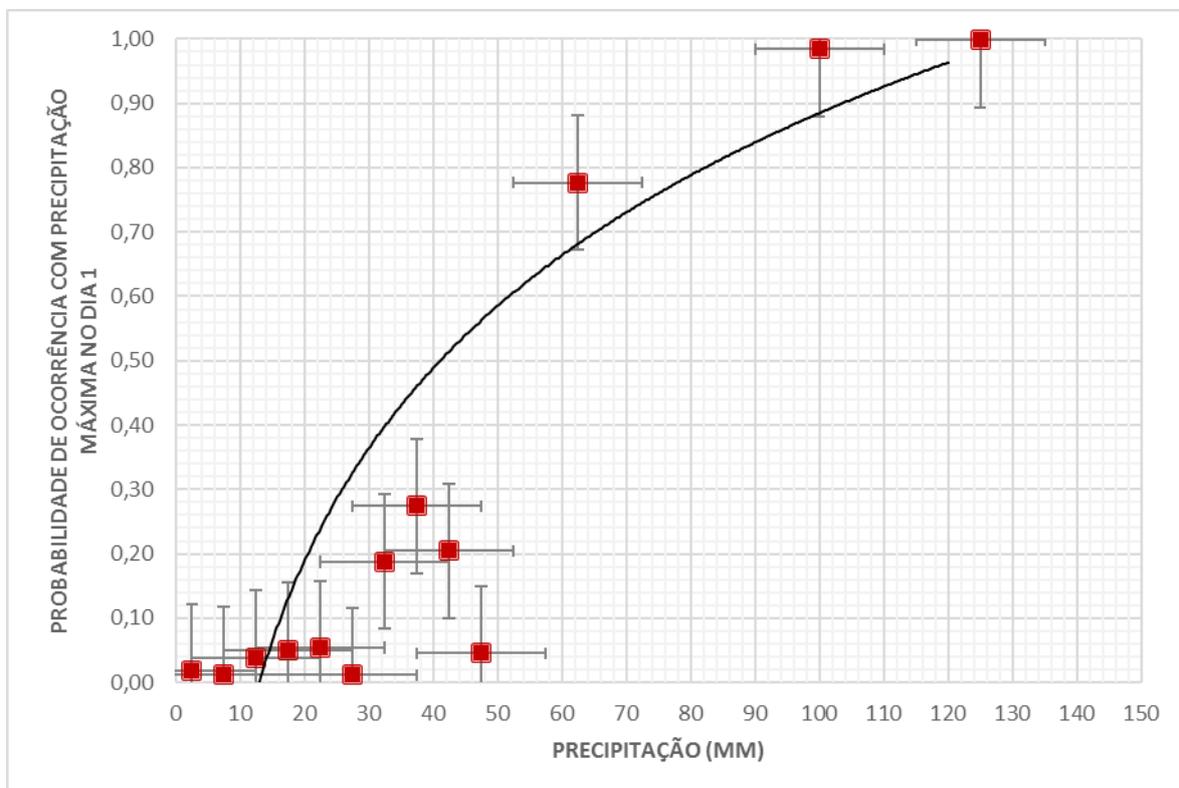


Figura 1.10. Gráfica de probabilidad de inestabilidad en el intervalo de precipitación, en el mismo día.

Por su parte, el gráfico de la figura 1.11 muestra la probabilidad de que un episodio de precipitación cause inestabilidad el mismo día y hasta 4 días después de aquel en el que se produjo la precipitación. En este gráfico, lo que se verifica es que, por ejemplo, para una precipitación de 60 mm, la probabilidad de que ocurra el mismo día, como ya se mencionó, es superior al 70%.

Si el evento no ocurre ese día, la probabilidad de que esta precipitación influya en los días siguientes, hasta 4 días después, en que se desarrolle una inestabilidad es aproximadamente del 45%.

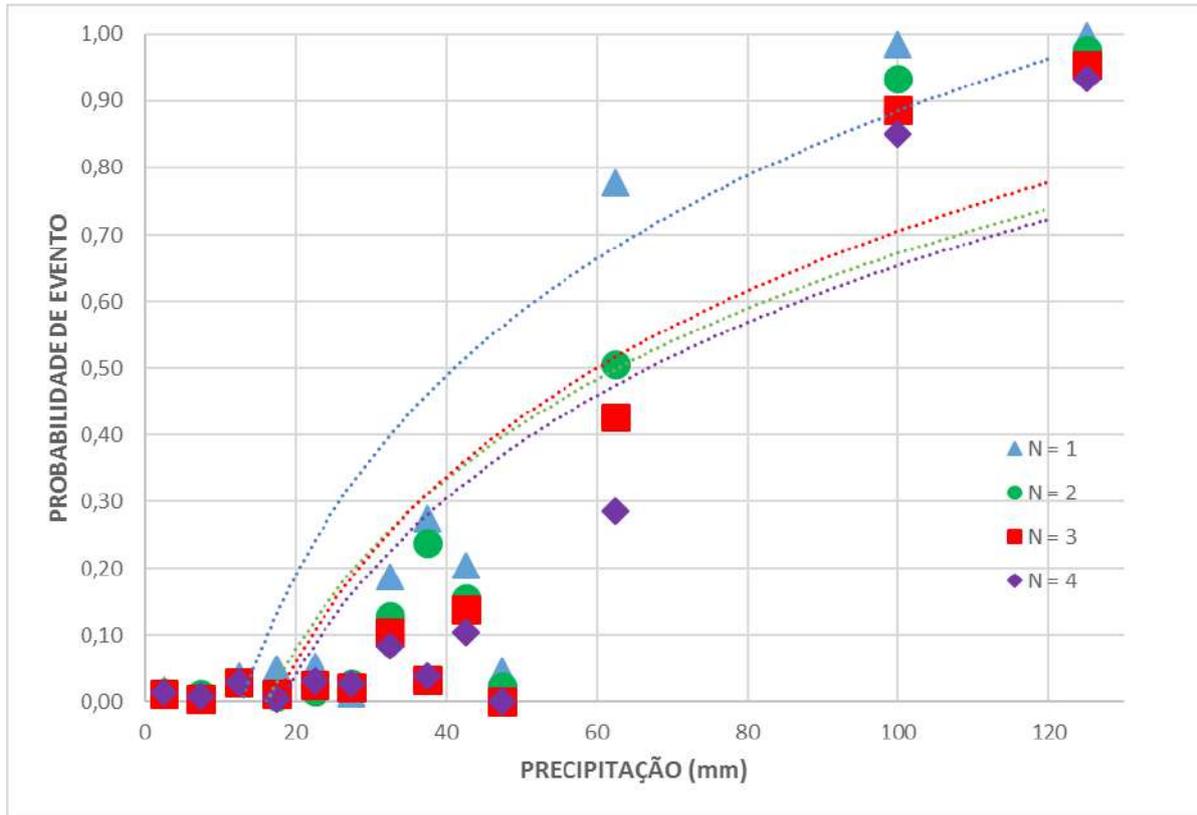


Figura 1.11. Probabilidad de ocurrencia de inestabilidad geomorfológica en función de la precipitación.

Finalmente, el gráfico de la figura 1.12 representa el cruce de probabilidades de que se produzca un determinado nivel de precipitación en un día y de que ese nivel de precipitación diario provoque que se desarrolle un evento de inestabilidad.

La conclusión del estudio refleja que cuando la precipitación es reducida también se reduce la probabilidad de que se produzcan inestabilidades de laderas. En cambio, cuando se produce una precipitación alta, especialmente a partir de los 60 mm, la probabilidad aumenta considerablemente.

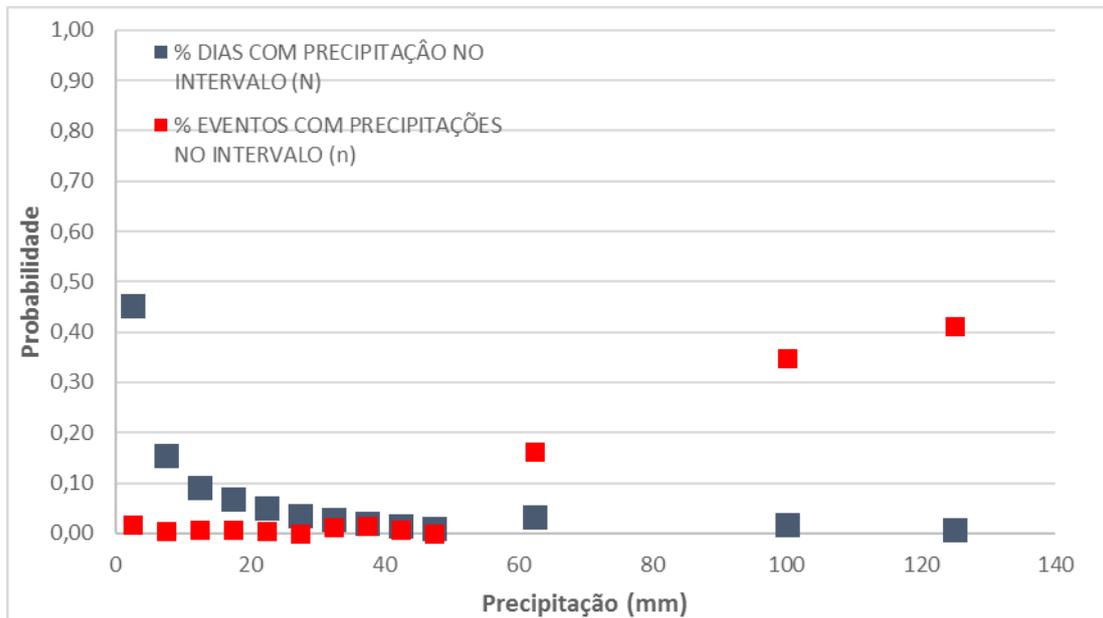


Figura 1.12. Relación entre el % de días con precipitación en el intervalo N (azul) y el % de inestabilidades que ocurrieron para ese nivel de precipitación (rojo).

Para su aplicación sobre territorios predominantemente rocosos se desarrolló un estudio estadístico análogo utilizando la base de datos del Cabildo Insular de Tenerife. Siguiendo un procedimiento similar se ha logrado establecer una relación de causalidad entre el nivel de precipitación que se puede concentrar en una determinada área geográfica y la probabilidad de que se pueda desarrollar un suceso de este tipo.

A la vista de que esta relación se verá afectada por el tipo de orografía que caracterice la zona sobre la que se pretende realizar la previsión, en función de que el relieve pueda ser más o menos escarpado, se establecen dos curvas de pronóstico en la gráfica de la figura 1.13. Una es aplicable al relieve accidentado que se observa habitualmente en los archipiélagos de la Macaronesia y la segunda, que refleja unas probabilidades más altas, corresponde a territorios también frecuentes en estos archipiélagos que sufren una orografía especialmente abrupta y sufren un mayor nivel de riesgo.

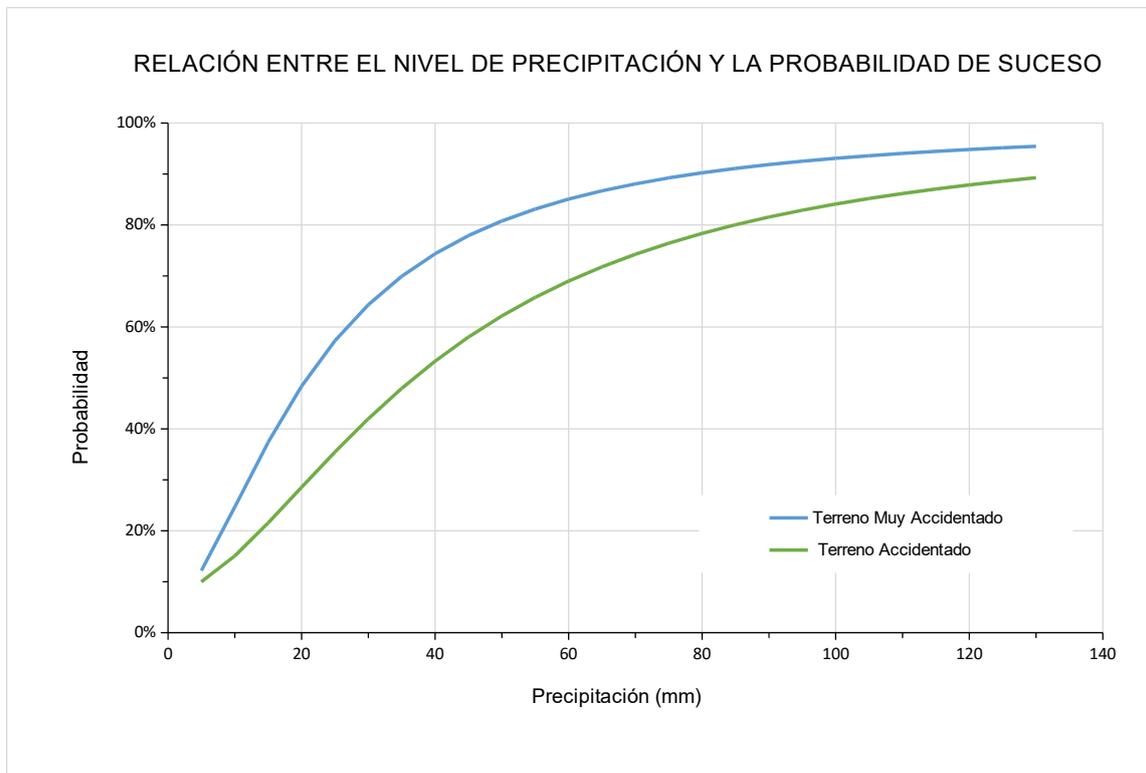


Figura 1.13. Gráfica que relaciona niveles de precipitación y probabilidades de desencadenamiento de inestabilidades para territorios de relieve accidentado y muy accidentado.

Del mismo modo, en Madeira, el procesamiento de datos permitió la construcción del gráfico de la Figura 1.14 mediante el que también es posible estimar la probabilidad de ocurrencia de inestabilidades debido a la precipitación producida en las últimas 24 horas. En este caso, una precipitación diaria de aproximadamente 80 mm corresponde a una probabilidad de ocurrencia del 70% de fenómenos de inestabilidad.

La aplicación de estas curvas podría tener gran utilidad en el ámbito de la prevención de riesgos ya que pueden facilitar la toma de decisiones de cara a implementar medidas de protección de la población limitando, por ejemplo, la movilidad en determinadas zonas en respuesta a una alerta por previsión de elevados niveles de precipitación a partir de un cierto nivel de probabilidad de ocurrencia de la inestabilidad.

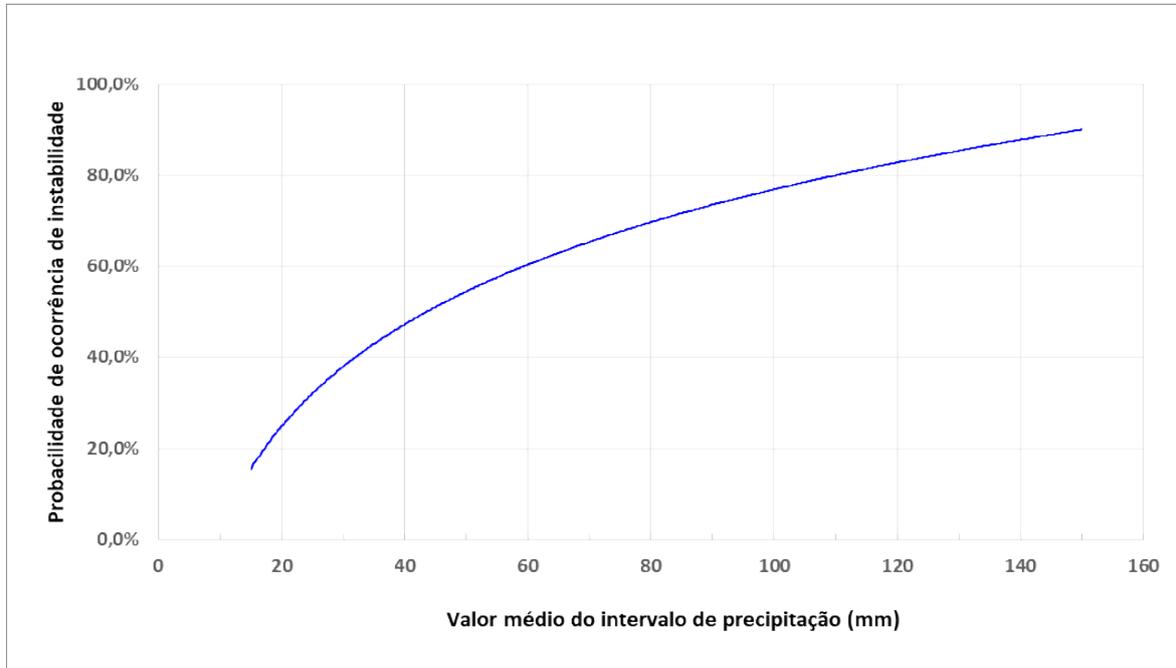


Figura 1.14. Gráfica probabilidad de inestabilidad en el intervalo de precipitación diaria en la isla de Madeira

Temporales de viento y oleaje

Los temporales marítimos con fuerte oleaje y viento son también una causa frecuente de desprendimientos en laderas rocosas y taludes en zonas acantiladas. Las principales acciones de dichos temporales son:

- Erosión y socavación de las bases de acantilados por oleaje.
- Erosión de los depósitos acumulados a pie de los acantilados.
- Inundación de la base de taludes y laderas por ascenso del nivel del mar.
- Agrietamiento de las cabeceras de taludes.
- Desprendimientos y deslizamientos en acantilados con presencia de rocas blandas y en macizos rocosos fracturados.



Figura 1.15. Acantilado erosionado por la acción de las carreras de mareas (Isla de la Gomera, Canarias).

Los temporales atlánticos vienen acompañados de fuertes vientos ciclónicos que pueden alcanzar en alguna ocasión los 150 km/h, incidiendo, junto con las precipitaciones en la estabilidad de las laderas y acantilados que se encuentran en condiciones precarias de estabilidad. Sin embargo, no son necesarios vientos tan fuertes para desencadenar inestabilidades, de acuerdo con la escala de Beaufort y datos observacionales en Canarias, para vientos mayores de 60 km/h se pueden producir inestabilidades de taludes en zonas costeras, y a partir de 70 km/h en zonas del interior.

b) Sismicidad.

Los terremotos pueden provocar movimientos de todo tipo en las laderas y taludes, dependiendo tanto de las características y propiedades de los materiales como de la magnitud del sismo y de la distancia al epicentro. En ocasiones, los daños producidos por los movimientos de ladera sobrepasan el daño generado directamente por el terremoto, aunque los planes de ordenación territorial y las normas de construcción sismorresistente no hacen mención específica a los problemas de estabilidad de laderas y taludes.

Los desprendimientos y caídas de bloques son los movimientos más frecuentes provocados por los terremotos, afectando a bloques rocosos sueltos o rocas fracturadas y en condiciones límite de estabilidad.

La Figura 1.16 presenta un ejemplo de las relaciones entre la magnitud y la distancia epicentral para diferentes tipos de movimientos. No obstante, debe considerarse en cada caso la influencia de las condiciones relacionadas sobre todo con la topografía y relieve de la zona, con las propiedades mecánicas de los materiales y con la presencia de agua; todos ellos pueden acentuar la aceleración de las ondas sísmicas.

En general, puede considerarse que el valor mínimo de la magnitud de un terremoto para que pueda inducir caída de bloques sueltos es $M_L = 4.0$. Según Keefer (1984), considerando los eventos ocurridos en EE.UU. en un periodo de 20 años puede estimarse la siguiente relación entre la magnitud mínima y los tipos de movimientos:

- $M_L \cong 4.0$: desprendimientos y deslizamientos rocosos y de bloques de suelo
- $M_L \cong 4.5$: deslizamientos masivos de suelo y deslizamientos de bloques de suelo
- $M_L \cong 5.0$: deslizamientos rocosos masivos, deslizamientos de bloques rocosos, flujos de tierra lentos y rápidos y deslizamientos subacuáticos
- $M_L \cong 6.0$: avalanchas rocosas
- $M_L \cong 6.5$: avalanchas de suelos.

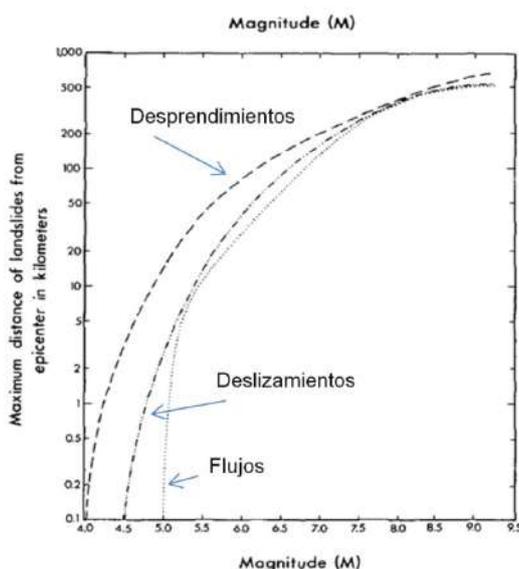


Figura 1.16. Relación entre la magnitud del terremoto y la distancias epicentral para el desencadenamiento de diferentes tipos de movimientos (Keefer, 1984).

c) Acciones bio-antrópicas.

Las actuaciones humanas modifican las condiciones y fuerzas que actúan sobre las laderas, o generan nuevos estados de esfuerzos. Las excavaciones, la construcción de edificios, estructuras, terraplenes, rellenos o escombreras sobre las laderas y las voladuras en zonas cercanas, entre otros, provocan la variación de los estados tensionales del terreno, de las condiciones hidrogeológicas y de sus propiedades geotécnicas desencadenando las consiguientes inestabilidades.

Excavaciones y rellenos

Las excavaciones superficiales para vías de comunicación y transporte, boquillas de túneles, canteras y otras obras varían los perfiles de equilibrio de las laderas y pueden desencadenar, reactivar o acelerar movimientos, dependiendo de otros factores condicionantes, como la estructura geológica, la resistencia o el contenido en agua del terreno. En este sentido, las excavaciones más desfavorables son las que se realizan a pie de las laderas por ser ésta la zona más vulnerable en cuanto a la estabilidad de la ladera, al soportar las mayores tensiones.

Las excavaciones influyen igualmente en la alteración de los flujos de agua y los sistemas de drenaje superficial, y en la modificación del comportamiento hidrogeológico de la ladera, al variar los niveles freáticos y los flujos o dar lugar a la acumulación de agua en determinadas zonas.

Los rellenos, terraplenes, escombreras, etc. sobre pendientes o sobre las cabeceras de los taludes y laderas transmiten cargas al terreno que pueden inducir inestabilidades al modificar la distribución de las cargas y el estado de esfuerzos.

Vibraciones

Las vibraciones originadas en el terreno producen sobrecargas dinámicas, cuyo origen pueden ser voladuras, circulación de maquinaria y vehículos pesados, etc. Estas sobrecargas modifican el estado de fuerzas o esfuerzos que actúan sobre una ladera o talud, y pueden llegar a generar inestabilidades y roturas.

Obras de incidencia en la red de drenaje

En laderas de áreas urbanas, las filtraciones y pérdidas de agua de los depósitos y de las redes de abastecimiento y saneamiento, pueden inducir inestabilidades. El riego de jardines y la construcción de infraestructuras para el almacenamiento de agua, sin las medidas adecuadas para evitar su infiltración hacia al interior de la ladera, son también causa de deslizamientos. El control de los sistemas de drenaje es muy importante en zonas urbanizadas. Otra causa frecuente de inestabilidades son las filtraciones por rotura de canalizaciones, canales, acequias, etc.

Además de los anteriores factores desencadenantes de inestabilidades, el crecimiento de raíces entre las rocas en zonas húmedas y el pastoreo entre otros, constituyen igualmente factores que contribuyen a la inestabilidad de taludes y laderas.



Figura 1.17. Ejemplo de crecimiento de raíces que se introducen en las grietas de las rocas.

CAPÍTULO 2. Tipos de inestabilidad.

La naturaleza litológica del macizo rocoso o de los suelos, guarda una estrecha relación con el tipo de inestabilidad que puede ocurrir, teniendo las diferentes litologías o tipos de suelos distinto grado de susceptibilidad potencial ante la ocurrencia de deslizamientos o roturas, mientras que las propiedades físicas y resistentes de cada tipo de material, junto con la presencia de agua, gobiernan su comportamiento geomecánico.

En el cuadro 2.1 se recogen las Unidades Geotécnicas más características en materiales volcánicos. En el *Anejo I* se presentan unas fichas en las que se explica cada una de las unidades geotécnicas y los tipos de movimiento de ladera asociados a cada una de ellas, así como los problemas geotécnicos más comunes.

Cuadro 2.1. Unidades geotécnicas de la Macaronesia.

Unidad Geotécnica	Subunidad
Unidad I: Complejos basales	
Unidad II: Coladas y macizos sálicos masivos	
Unidad III: Coladas basálticas alteradas	
Unidad IV: Coladas basálticas sanas	IVa: Muy escoriáceas y/o pahoe-hoe
	IVb: Masivas o poco escoriáceas
Unidad V: Materiales Piroclásticos	Va: Ignimbritas soldadas
	Vb: Tobas surtseyanas
	Vc: Aglomerados de naturaleza pumítica
	Vd: Aglomerados de naturaleza basáltica
	Ve: Aglomerados brechoides
	Vf: Depósitos piroclásticos pumíticos sueltos
	Vg: Depósitos piroclásticos basálticos sueltos
	Vh: Ignimbritas no soldadas
Unidad VI: Depósitos aluvio-coluviarios	
Unidad VII: Arenas litorales	
Unidad VIII: Suelos arcillosos y limosos	
Unidad IX: Suelos superficiales y vegetales	
Unidad X: Caliches	
Unidad XI: Rellenos antrópicos	

En el cuadro 2.2 se relacionan los diferentes tipos de movimiento de laderas con observaciones en el terreno y pendientes entre otros.

Cuadro 2.2. Algunos rasgos generales característicos identificativos de los movimientos de laderas.

Tipo de movimiento	Zona de cabecera y parte superior de la ladera	Pendientes y dimensiones	Zona baja de la ladera
Desprendimientos (apartado 2.1)	Laderas irregulares y rocosas escarpadas con material suelto o derrubios en la parte superior Bloques independizados por discontinuidades o fracturas Grietas tras el talud Vegetación escasa	Pendientes elevadas > 50°	Acumulación de bloques y fragmentos rocosos
Deslizamientos rotacionales (apartado 2.3)	Grietas de tracción curvas y cóncavas Escarpes curvos con estrías, verticales en la parte superior Superficies basculadas con encharcamientos Contrastes de vegetación Malas condiciones de drenaje y encharcamientos en depresiones	Pendientes entre 20-40° D/L < 0.3 a 0.1	Depósitos convexos, lobulados Desvío de cauces
Deslizamientos traslacionales en rocas o suelos (apartado 2.3)	Grietas de tracción verticales paralelas al talud Escarpes verticales poco profundos Material agrietado en bloques No encharcamientos en cabecera Drenaje desordenado o ausencia del mismo	Pendientes uniformes D/L < 0.1	Desvío de cauces En ocasiones acumulaciones de material con forma de lóbulos
Desplazamientos laterales (apartado 2.3)	Bloques desplazados y basculados Pendientes suaves o muy suaves Grandes grietas separando los bloques Bloques con formas irregulares controladas por fracturas Sistemas de drenaje interrumpidos, obstrucciones en cauces	Pendientes suaves, incluso < 10°	
Flujos de barro (apartado 2.4)	Nichos cóncavos poco profundos Pocas grietas Contrastes en la vegetación con las zonas estables Encharcamientos No irregularidades importantes en el drenaje	Pendientes 15-25° D/L = 0.05-0.01	Lóbulos. Morfología irregular ondulada
Flujo de tierra y derrubios (apartado 2.4)	Concavidades y lóbulos en el área fuente Varios escarpes Depósitos con forma de corriente en valles Ausencia de vegetación Drenaje irregular y disturbado en la masa deslizada	Pendientes > 25° D/L muy pequeño	Lóbulos, depósitos convexos Morfología irregular

D, L = profundidad y longitud de la masa desplazada.

Las inestabilidades en las laderas volcánicas, pueden clasificarse según los materiales involucrados en los procesos, distinguiendo generalmente entre macizos rocosos o rocas, derrubios y suelos, y también por los mecanismos y tipos de rotura. Determinadas clasificaciones consideran también otros aspectos como el contenido en agua del terreno, y la velocidad y magnitud de los movimientos.

A continuación se describen los principales tipos que se refieren en la mayoría de las clasificaciones, aplicables a las laderas volcánicas:

- Desprendimientos
- Deslizamientos
- Avalanchas rocosas
- Flujos o coladas

2.1. Desprendimientos o caídas de rocas:

Los **desprendimientos** son caídas repentinas de bloques o masas de bloques rocosos independizados por planos de discontinuidad preexistentes (diaclasas, superficies de estratificación, grietas de tracción, etc.). El material desciende ladera abajo principalmente por caída libre, rebotando o rodando. Los desprendimientos son frecuentes en laderas de zonas montañosas escarpadas, en acantilados y, en general, en paredes rocosas, siendo frecuentes las roturas en forma de cuña y en bloques más o menos paralelepípedicos formados por varias familias de discontinuidades.

Son los procesos de inestabilidad de laderas más frecuentes y extendidos, y también los que mayores daños causan, tanto económicos como humanos.

Los factores que provocan este tipo de roturas son la erosión y pérdida de apoyo o descalce de los bloques previamente independizados o sueltos, el agua presente en las discontinuidades y grietas, las sacudidas sísmicas, etc. En la Figura 2.1 se presenta un esquema de desprendimientos.

Aunque los bloques desprendidos pueden ser de poco volumen, al ser procesos repentinos, suponen un riesgo importante en vías de comunicación y edificaciones en zonas de montaña (Figura 2.2).

Pueden también darse desprendimientos de masas de suelos en laderas o taludes verticales, generalmente a favor de grietas de tracción generadas a causa del estado tensional o de grietas de retracción por desecación del terreno.

Los **vuelcos** de estratos o de fragmentos de masas rocosas o suelos se incluyen dentro de los desprendimientos. Suelen darse principalmente en frentes rocosos con estratos verticalizados (Figura 2.3).

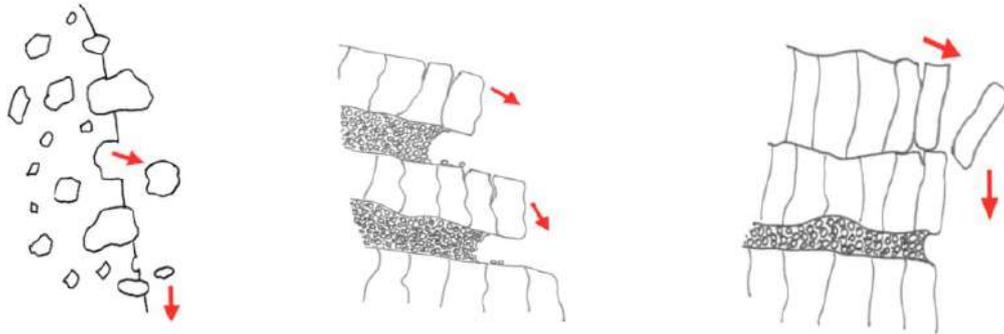


Figura 2.1. Esquema de desprendimientos con caída libre a la izquierda, caída por descalce al centro y caída por vuelco a la derecha de la figura.



Figura 2.2. Desprendimientos rocosos en talud de carretera con corte de la circulación, (Cabo Verde).



Figura 2.3. Desprendimientos por vuelco de estratos en el frente de una colada basáltica con diaclasado de retracción preferentemente vertical, playa del Ancón (Isla de Tenerife, Canarias).

2.2. Avalanchas rocosas.

Las **avalanchas rocosas** son procesos muy rápidos de caída de grandes masas de rocas o derrubios que se desprenden de laderas escarpadas que se rompen y pulverizan durante la caída, dando lugar a depósitos con una distribución caótica de bloques, con tamaños muy diversos, sin estructura, prácticamente sin abrasión y con gran porosidad. En la Figura 2.4 se presenta un esquema de avalancha de derrubios.

Las avalanchas son generalmente el resultado de deslizamientos o desprendimientos de gran magnitud que, por lo elevado de la pendiente y la falta de estructura y cohesión de las masas rotas, descienden a gran velocidad ladera abajo en zonas abruptas, pudiendo superar los 100 km/hora, incluso si las masas están completamente secas, por la disminución de la fricción a que da lugar la presencia de aire entre los materiales y fragmentos rocosos. El agua de precipitación o deshielo, los movimientos sísmicos y las erupciones volcánicas pueden jugar un papel importante en el desencadenamiento de estos procesos.

Las **avalanchas de derrubios** están formadas por material rocoso muy heterométrico, pudiendo incluir grandes bloques, y abundante material fino; los depósitos morrénicos constituyen un material propenso para estos procesos, así como las acumulaciones de

materiales procedentes de erupciones volcánicas. La diferencia con los flujos de derrubios, además de la presencia de agua (no necesaria en las avalanchas), es la rapidez del proceso y velocidad que alcanza la masa en zonas con pendiente elevada.



Figura 2.4. Esquema de avalancha rocosa.

2.3. Deslizamientos.

Los **deslizamientos** son movimientos de masas de suelo o roca que deslizan sobre una o varias superficies de rotura netas al superarse la resistencia al corte de estos planos; la masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad en su recorrido; la velocidad puede ser muy variable, pero suelen ser procesos rápidos y alcanzar grandes proporciones (varios millones de metros cúbicos). En ocasiones, cuando el material deslizado no alcanza el equilibrio al pie de la ladera (por su pérdida de resistencia, contenido en agua o por la pendiente existente), la masa puede seguir en movimiento a lo largo de cientos de metros y alcanzar velocidades muy elevadas, dando lugar a un flujo; los deslizamientos también pueden ocasionar avalanchas rocosas.

Pueden producirse deslizamientos en derrubios (por ejemplo en los coluviones sobre las laderas, a favor del contacto con el sustrato rocoso, o en laderas rocosas muy alteradas y fracturadas, a favor del contacto con la roca sana), que generalmente dan lugar a flujos de derrubios conforme deslizan ladera abajo, ya que suelen ocurrir en condiciones de saturación del material.

Los **deslizamientos rotacionales** (Figura 2.5) son más frecuentes en suelos cohesivos. La rotura, superficial o profunda, tiene lugar a favor de superficies curvas o en forma de cuchara. Una vez iniciada la inestabilidad, la masa empieza a rotar, pudiendo dividirse en varios bloques que deslizan entre sí y dan lugar a “escalones” con la

superficie basculada hacia la ladera y a grietas de tracción estriadas. Sus dimensiones más frecuentes varían entre varias decenas y algunos centenares de metros tanto en longitud como en anchura, y pueden ser superficiales o profundos (el límite puede establecerse en torno a los 10 m). La parte inferior de la masa deslizada se acumula al pie de la ladera formando un depósito tipo lóbulo con grietas de tracción transversales (Figura 2.5). Dependiendo del tipo de suelos y del contenido en agua, se pueden generar flujos.

Los macizos rocosos blandos o con alto grado de fracturación o alteración, donde las discontinuidades no constituyen superficies de debilidad preferentes, pueden también sufrir este tipo de rotura.

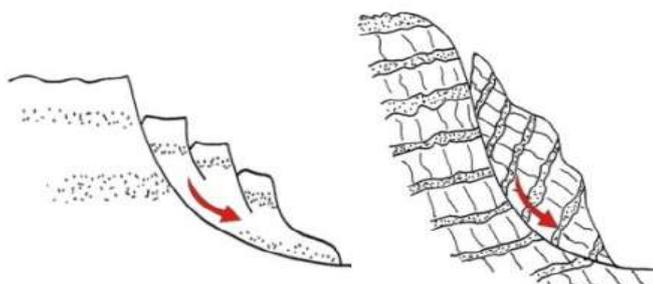


Figura 2.5. Esquema de deslizamientos rotacionales, de suelos a la izquierda y de rocas a la derecha.

En los **deslizamientos traslacionales** la rotura tiene lugar a favor de superficies planas de debilidad o discontinuidades preexistentes (pueden ser superficie de estratificación, planos de contacto entre diferentes tipos de materiales, superficies estructurales, etc.); en ocasiones, el plano de rotura puede ser una fina capa de material arcilloso entre estratos más duros o de mayor competencia. No suelen ser muy profundos, aunque sí pueden tener gran extensión y alcanzar grandes distancias. Pueden darse tanto en suelos como en rocas, y las masas que deslizan en ocasiones son bloques rectangulares previamente independizados por discontinuidades o por grietas de tracción (deslizamientos de bloques). Son frecuentes en este tipo de inestabilidades los movimientos a impulsos o en fases diferentes en el tiempo según las condiciones de resistencia de los planos de deslizamiento, que no tienen por qué presentar una pendiente elevada, basta en ocasiones con unos pocos grados. Generalmente, los deslizamientos traslacionales son más rápidos que los rotacionales, dadas las características cinemáticas del mecanismo de rotura.



Figura 2.6. Deslizamiento traslacional de piroclastos sobre basaltos alterados (Isla de Gran Canaria, Canarias).

En rocas volcánicas estos movimientos suelen estar inducidos por procesos gravitacionales, lluvias intensas, actividad volcánica e incluso actividad humana. Afectan en general a casi todos los tipos de unidades geotécnicas, no solo a las correspondientes a materiales sueltos o fácilmente deleznable (Figura 2.6), sino a las unidades de macizos rocosos duros que puedan estar afectadas por un intenso diaclasado.

2.4. Flujos o coladas:

Los **flujos** o coladas son movimientos de masas de suelos (flujos de barro o tierra), derrubios (coladas de derrubios o “debris flow) o bloques rocosos (coladas de fragmentos rocosos) donde el material está disgregado y se comporta como un “fluido”, sufriendo una deformación continua y sin presentar superficies de rotura definidas. El agua es el principal agente desencadenante, por la pérdida de resistencia a que da lugar en materiales poco cohesivos. Principalmente afectan a suelos arcillosos susceptibles que sufren una considerable pérdida de resistencia al ser movilizados; estos movimientos, poco profundos en relación a su extensión, presentan una morfología tipo glaciar, y pueden tener lugar en laderas de bajas pendientes (incluso menores de 10°).



Figura 2.7. Coladas de derrubios o "debris flow" producidas en depósitos coluviales tras las intensas lluvias acaecidas en la isla de El Hierro en noviembre de 2004.

Las **coladas de barro o tierra** ("mudflow" o "earthflow") se dan en materiales predominantemente finos y homogéneos, y su velocidad puede alcanzar varios metros por segundo; la pérdida de resistencia del material suele estar motivada por su saturación en agua. Se clasifican según el tipo de material, características resistentes y el contenido en agua (Figura 2.8). Los flujos de barro generalmente presentan pequeñas magnitudes, pero en ocasiones, sobre todo en condiciones de saturación del material, pueden ser muy extensos y rápidos, teniendo consecuencias catastróficas en caso de alcanzar zonas pobladas. Los depósitos de materiales finos volcánicos, por sus propiedades físicas y geomecánicas, son especialmente susceptibles a este tipo de procesos.

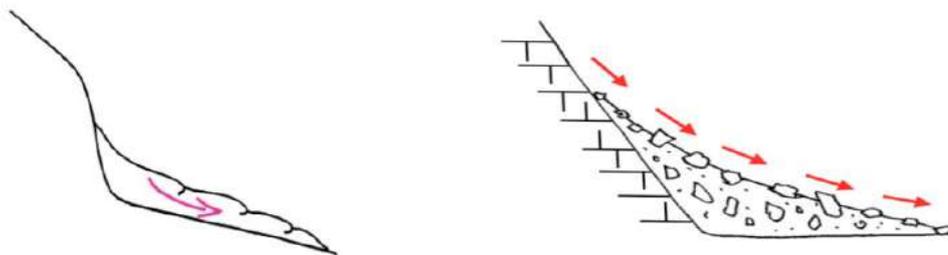


Figura 2.8. Esquemas de flujos de barro a la izquierda y flujo de tierras y derrubios a la derecha.

En los materiales tipo loess (limosos o limo-arcillosos con estructura poco porosa) y en arenas secas pueden tener lugar flujos inducidos por movimientos sísmicos, provocados

generalmente por colapsos repentinos debidos a la rotura de los débiles enlaces entre partículas; si estos materiales se encuentran saturados o sumergidos, se crea una masa sin cohesión que puede fluir con velocidades muy elevadas. Estas movilizaciones bruscas por colapso estructural del suelo, debido a sacudidas sísmicas o a rotura del suelo por desecación, se denominan golpes de arena y limo, término que hace más bien referencia a la causa del movimiento.

Los flujos de derrubios son movimientos complejos que engloban a fragmentos rocosos, bloques, cantos y gravas en una matriz fina de arenas, limos y arcilla. Generalmente tienen lugar en laderas cubiertas por material suelto o no consolidado, y especialmente en aquellas donde no existe cobertura vegetal.

Los flujos pueden ser consecuencia de deslizamientos, al saturarse los materiales deslizados y continuar fluyendo ladera abajo, o ser inducidos por desprendimientos rocosos. Junto con los deslizamientos son los movimientos de ladera más extendidos, al afectar a muy diversos tipos de materiales.

Dentro de los flujos se incluyen otros varios tipos de procesos con características propias, como la **reptación**, movimiento superficial (unos pocos decímetros) muy lento, prácticamente imperceptible, que afecta a suelos y materiales alterados, provocando deformaciones continuas que se manifiestan al cabo del tiempo en la inclinación o falta de alineación de árboles, vallas, muros, postes, etc. en las laderas. La **solifluxión** afecta igualmente al terreno más superficial de las laderas, y es un movimiento producido por los procesos hielo-deshielo que, por los cambios de temperatura diarios o estacionales, afecta al agua contenida en los suelos finos en zonas o regiones frías.

CAPÍTULO 3: Diagnóstico previo.

En este capítulo se exponen dos herramientas que permiten llevar a cabo una evaluación inicial de manera rápida de las condiciones de estabilidad de laderas y taludes susceptibles de desarrollar inestabilidades. La primera es el Índice de Susceptibilidad de Inestabilidad de Taludes en Terrenos Volcánicos (ISTV) que tiene aplicación en los archipiélagos predominantemente rocosos como son los de Canarias, Madeira y Cabo Verde donde el fenómeno más frecuente son los desprendimientos y la segunda es la Ficha de Campo para Evaluación de Estabilidad en Suelos que tiene mayor relevancia en el de Azores donde se produce una mayor frecuencia de deslizamientos.

Tanto si la inestabilidad ya se ha producido como si se trata de un talud del que se quiera conocer su estado, debe realizarse un reconocimiento del lugar y emitir un diagnóstico previo en el que se valoren de forma preliminar las condiciones de seguridad del talud o ladera y su entorno.

3.1. Toma de datos sobre un suceso ya producido

En el caso de que la inestabilidad ya se haya producido se deberá atender a las consecuencias del suceso y recoger la información necesaria para su valoración. Se realizará una visita técnica para recabar, al menos, la siguiente información:

- Circunstancias en las que se ha producido la inestabilidad.
- Daños: infraestructuras, edificaciones, etc. que se hayan visto afectadas o que pudieran serlo si se produjera un nuevo evento.
- Condiciones meteorológicas en las que se produjo la inestabilidad.
- Acciones antrópicas o de otro origen que hayan podido causar la inestabilidades, como voladuras, excavaciones...
- Otras observaciones referentes al volumen de material desprendido, posibles áreas fuente y procedencia, así como la naturaleza litológica de los materiales y los datos básicos de la geometría del talud o ladera (altura, pendiente, perfil aproximado...).

3.2. El índice de susceptibilidad ISTV.

El Índice de Susceptibilidad de Inestabilidad de Taludes en terrenos Volcánicos (ISTV) es una herramienta que permite realizar una evaluación preliminar de los taludes con el fin de

clasificarlos en función de su susceptibilidad a generar desprendimientos y así poder priorizar el estudio de aquellos que presenten mayor grado de susceptibilidad. Es aplicable a rocas volcánicas excluyendo materiales muy meteorizados o alterados y depósitos de suelos, derrubios de ladera o coluviales.

La susceptibilidad no indica una probabilidad de ocurrencia sino que trata de describir la posibilidad de que se produzca una inestabilidad bajo la influencia de determinadas condiciones que no se consideran en el análisis. Es decir, que a pesar de que un talud pueda presentar menor susceptibilidad que otro, puede tener mayor probabilidad de generar una inestabilidad si sus condiciones de contorno son más propicias para su desarrollo.

De la aplicación de este índice se obtienen dos valores: el denominado ISTV básico, y el ISTV corregido, que multiplica el ISTV básico por un factor que se determina en función del número de indicadores que se identifiquen en el terreno o infraestructuras y construcciones que puedan estar afectadas por el talud.

En primer lugar el ISTV define tres tipologías de macizos a través de las cuales se trata de tomar en consideración, en cada caso, las características particulares que determinan el comportamiento de los taludes volcánicos frente a la inestabilidad:

- Macizos tipo A: contempla los taludes formados únicamente por niveles o paquetes de rocas duras (>20 MPa) como son las que se forman a partir del enfriamiento de coladas basálticas y sálicas y de los depósitos piroclásticos compactos, como pueden ser tobas o ignimbritas soldadas.



Figura 3.1. Ejemplo de Macizo tipo A formado por una colada fonolítica. (Isla de Tenerife, Canarias).

- Macizos tipo B: Abarca los taludes formados por materiales piroclásticos de caída, de naturaleza basáltica y sálica, en los que sus partículas están poco o nada soldadas y que presentan características de roca blanda o suelo duro.



Figura 3.2. Ejemplo de Macizo tipo B formado por piroclastos basálticos. (Isla de San Miguel, Azores).

- Macizos tipo C: Son aquellos en los que se produce una alternancia de materiales de distinta competencia (duro, blando) o erosión diferencial entre capas de materiales similares.



Figura 3.3. Ejemplo de Macizo tipo C formado por alternancias de coladas y escorias de coladas basálticas, donde se puede apreciar la erosión diferencial entre ambos tipos de material. (Isla de Tenerife, Canarias).

Para cada tipo de macizo se indican aquellos factores específicos vinculados a su estabilidad que habrá que estudiar en cada caso: en los macizos tipo A se estudia su

fracturación y la posición de los bloques, en los del tipo B su grado de compactación y en los del tipo C el grado de erosión diferencial.

El indicador básico del ISTV se calcula incorporando dos factores más que son comunes para cualquier tipo de talud como son su pendiente y la cercanía al mar.

Finalmente, para realizar el cálculo del ISTV corregido, si se observa la presencia de alguno de los indicadores expuestos en el *apartado 2.3 del Anejo II*, se deberá multiplicar el ISTV básico por el *índice i* obtenido a partir del número de indicadores presentes.

El resultado del ISTV, ya sea básico o corregido, alcanzará una valoración entre 0 y 100 puntos que permitirá clasificar los taludes según el grado de susceptibilidad a las inestabilidades en: bajo, moderado, alto o muy alto según se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 3.1. Valores del ISTV.

Grado	Puntuación ISTV	Susceptibilidad
1	< 35	Baja
2	$\geq 35 < 60$	Moderada
3	$\geq 60 < 80$	Alta
4	> 80	Muy Alta

El resultado obtenido mediante el cálculo del índice de susceptibilidad de un talud permitirá valorar su estado de una manera previa y ofrecerá información sobre la conveniencia de realizar otros estudios adicionales de mayor intensidad y detalle.

También permitirá establecer una relación ordenada de una serie de taludes que se encuentren dentro de un ámbito de actuación administrativa o geográfico con la que poder priorizar la realización en el tiempo de los estudios posteriores pormenorizados a aquellos taludes que se estimen más necesarios.

Por lo tanto, un resultado de susceptibilidad muy alta no implica necesariamente que el talud vaya a sufrir una inestabilidad de manera inminente sino que debe realizarse urgentemente un estudio más detallado por parte de técnicos expertos que valoren su importancia y alcance para, en su caso, establecer las medidas de estabilización y control correspondientes.

Por otro lado, debe considerarse que el resultado obtenido por un talud o ladera tampoco es permanente. Ya que son elementos dinámicos que están en constante cambio, por lo que la clasificación que se obtenga deberá ser actualizada cada cierto tiempo.

3.3. Evaluación rápida de las condiciones de estabilidad en suelos

Los deslizamientos son movimientos de masas de suelo, tierra o roca que deslizan sobre una o varias superficies de rotura netas al superarse la resistencia al corte de estos planos. Uno de los primeros signos visibles en el suelo es la presencia de grietas transversales en la parte superior del talud o ladera. La masa desplazada durante el movimiento tiene grados de deformación muy variables según el tipo de deslizamiento, comportándose como una unidad en su recorrido. La velocidad puede ser muy variable, pero suelen ser procesos rápidos y alcanzar grandes proporciones (varios millones de metros cúbicos).

Este tipo de movimiento está sujeto a criterios de clasificación como, por ejemplo, tipo de ruptura tangencial, entre otros. De esta manera, los deslizamientos se dividen en rotacionales y traslacionales con fracturas compuestas y planas. Generalmente, los deslizamientos traslacionales son más rápidos que los rotacionales, dadas las características cinemáticas de sus mecanismos de rotura.



Figura 3.4 Deslizamientos traslacionales superficiales en taludes de depósitos piroclásticos pomíticos.

Los deslizamientos más frecuentes suelen ser traslacionales superficiales con ruptura plana. Generalmente ocurren en laderas con pendientes superiores a 35° , normalmente constituidas por depósitos piroclásticos pomíticos, con diferentes dimensiones granulométricas y evolución pedogenética. Usualmente, la profundidad de los planos de falla es menor de 2 m (Fig. 3.4),

indicando claramente que el esfuerzo cortante efectivo es reducido y que los parámetros de resistencia al corte están esencialmente controlados por el componente de fricción de los materiales.

En ocasiones, cuando el material deslizado no alcanza el equilibrio al pie de la ladera (por su pérdida de resistencia, contenido en agua o por la pendiente existente), la masa puede seguir en movimiento a lo largo de cientos de metros y alcanzar velocidades muy elevadas, dando lugar a un flujo o también pueden ocasionar avalanchas rocosas.

Los flujos son los mecanismos de movimiento de laderas con mayor potencial destructivo. Se caracteriza por un movimiento continuo donde el material está disgregado y se comporta como un fluido, sufriendo una deformación continua y sin presentar superficies de rotura definidas. El agua es el principal agente desencadenante, por la pérdida de resistencia a que da lugar en materiales poco cohesivos.

Por lo tanto están estrechamente relacionadas con períodos de lluvia intensa. Bajo condiciones hidrológicas y topográficas específicas evolucionan de una manera devastadora como los que ocurrieron en Azores en la localidad de Ribeira Quente, donde 29 personas perdieron la vida, y en la parroquia de Faial da Terra, donde se produjeron 3 víctimas mortales (Fig.3.5)



Figura 3.5 A la izquierda colada producida en Ribeira Quente y a la derecha en Faial da Terra.

Para minimizar los riesgos resultantes de las inestabilidades geomorfológicas, es esencial analizar la estabilidad de las pendientes y / o terraplenes a largo plazo, para prevenir futuros accidentes y mitigar los efectos negativos asociados con este tipo de fenómeno.

Los métodos de equilibrio limite se utilizan en ingeniería, que dividen la superficie deslizante potencial en rodajas, para evaluar la estabilidad de las pendientes naturales, excavaciones y

terraplenes. Algunos de los métodos de corte satisfacen algunas o todas las condiciones de equilibrio (fuerzas y momentos).

El enfoque global para obtener una indicación de la estabilidad de una ladera se realiza verificando la posibilidad de desarrollar una superficie de ruptura potencial, determinada por el factor de seguridad mínimo, que corresponde a la superficie de deslizamiento crítica. Para el análisis de la estabilidad mediante métodos de equilibrio límite es necesario conocer la geometría del terreno, las características geológicas (estratigrafía) y los parámetros físicos y mecánicos, así como las condiciones del agua existente.

Este tipo de inestabilidad tiene especial relevancia debido a su gran magnitud que puede causar daños graves no solo a infraestructuras y propiedades, sino que entre sus efectos también suelen contabilizarse pérdidas de vidas humanas.

Desde que comienza a observarse un proceso de inestabilidad que puede afectar a infraestructuras, edificios o áreas urbanas, se requiere la intervención de técnicos de las administraciones que se hayan visto afectadas para evaluar la estabilidad del elemento de que se trate.

Desde el punto de vista mecánico, los movimientos de ladera ocurren como resultado de un desequilibrio entre las fuerzas que inducen a la inestabilidad y las que favorecen su estabilidad. Esta interacción entre fuerzas se puede representar mediante un parámetro denominado Factor de Seguridad (FS) que se define por la relación entre la resistencia al corte (fuerzas estabilizadoras) y la tensión tangencial (fuerzas que promueven la inestabilidad), a lo largo de una superficie de ruptura real o potencial.

$$FS = \frac{\text{Resistencia al Corte}}{\text{Tensión Tangencial}}$$

De esta manera, una ladera o un talud puede considerarse inestable si ocurre que $FS \leq 1$, debido a una reducción de la resistencia al corte o a un aumento de la tensión tangencial. Si el factor de seguridad se encuentra entre 1 y 1.5, la ladera se considera marginalmente estable y si $FS \geq 1.5$, se considera estable (Abramson et al., 2002).

En las situaciones de urgencia, el análisis se realiza de forma cualitativa, en base a la experiencia de los técnicos involucrados, ya que la duración de los estudios detallados de

caracterización geotécnica, con sus correspondientes ensayos de laboratorio, son incompatibles con el corto período de tiempo disponible para la evaluación de la estabilidad de la ladera o el talud. Por lo tanto no es posible aplicar métodos de equilibrio límite o técnicas de análisis de esfuerzo – deformación. Por ello, uno de los objetivos del proyecto Macastab ha sido el desarrollo de un método rápido que permita evaluar sobre el terreno la estabilidad de un talud o una ladera compuestos por suelos e identificar las áreas que podrían verse afectadas por la propagación y retirada de material de una manera sencilla y rápida.

3.4. Ficha de campo para análisis rápido de estabilidad en suelos.

Este formulario de campo proporciona una herramienta de evaluación rápida, sobre el terreno, a los profesionales que se ocupan de evaluar los procesos de inestabilidad, para diagnosticar de manera preliminar las condiciones de la estabilidad de laderas y taludes compuestos de depósitos piroclásticos pomíticos con dimensiones granulométricas que pueden ir desde limos hasta grava.

En el Anejo III de este documento se explica más detalladamente el procedimiento a seguir y se recoge el formato de una ficha de campo fácil de completar utilizando únicamente datos de observación directa con el que es posible estimar de una manera inicial y rápida si una ladera puede desarrollar una inestabilidad de manera inminente.

Para la elaboración del formulario se realizaron numerosos análisis de estabilidad considerando diferentes escenarios morfológicos, geotécnicos e hidrológicos utilizando el método de cortes de Morgenstern-Price para obtener las superficies deslizantes más críticas, que corresponden al valor mínimo del factor de seguridad. Las ecuaciones matemáticas involucradas en el proceso de cálculo pueden consultarse, por ejemplo, en Abranson et al. (2002). Debido a la gran cantidad de posibles superficies deslizantes, se utilizó el software Slide (versión 6) para calcular la superficie deslizante más crítica en cada escenario recomendado.

El Factor de Seguridad se obtiene introduciendo los datos obtenidos en campo en una matriz que permite estimarlo en base a una batería de análisis de estabilidad sobre diferentes modelos en los que se consideraron diferentes escenarios de condiciones morfológicas (altura y pendiente), parámetros de resistencia al corte y condiciones del agua en el suelo. Se llevaron

a cabo aproximadamente 2.500 análisis de estabilidad para encontrar las superficies de ruptura crítica con las que se prepararon los ábacos. Para el diseño de estos ábacos, se tuvieron en cuenta las siguientes premisas:

- a) No se consideraron los valores de cohesión, debido a la naturaleza granular de la mayoría de los materiales volcánicos en el archipiélago de las Azores. Sin embargo, para fines de cálculo y para no inducir superficies de ruptura muy poco profundas, se asignó una cohesión residual de 1 kPa.
- b) Las laderas o taludes considerados estaban compuestas exclusivamente de suelos granulares.
- c) La densidad se mantuvo constante, con un valor de diseño de 16 kN / m³, que corresponde al valor promedio de los pesos de densidad saturada para depósitos pomíticos (Amaral, 2010);
- d) El análisis se lleva a cabo en términos de tensiones efectivas para evaluar el factor de seguridad a largo plazo y que se produce una ruptura en condiciones de drenaje, dada la permeabilidad moderada a alta de los depósitos pomíticos.

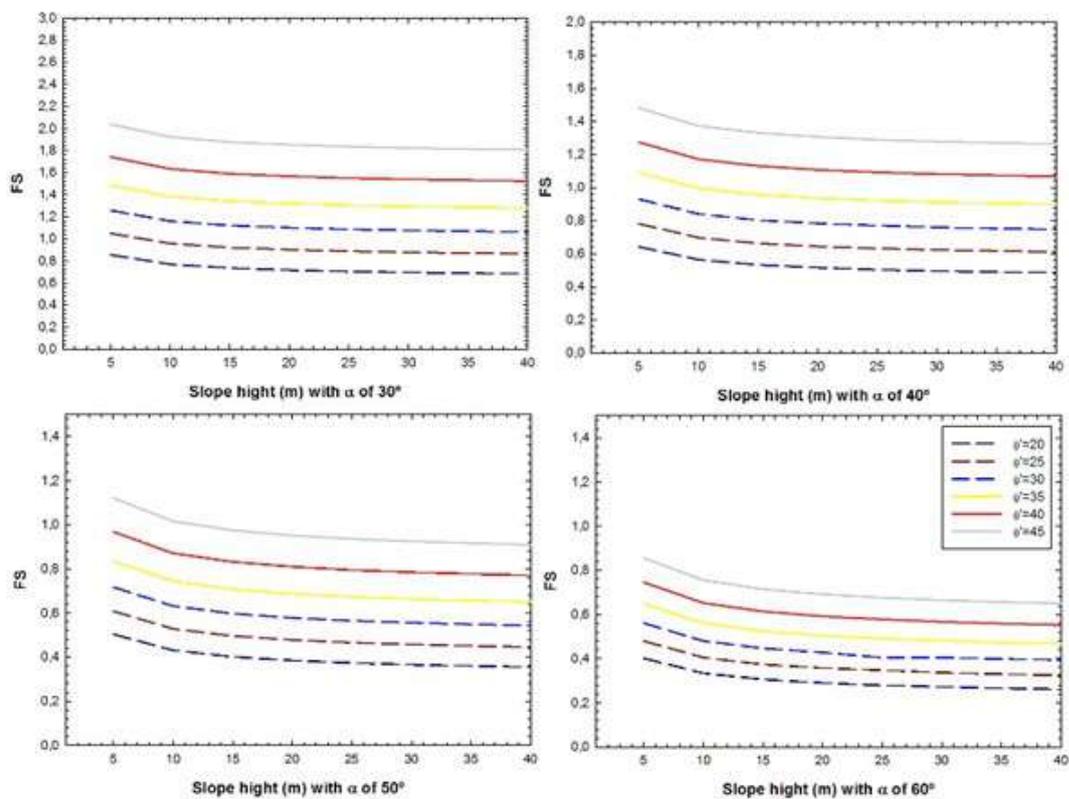


Figura 3.6 Ejemplo de los ábacos obtenidos. Variación FS en relación a diferentes escenarios geomorfológicos.

La Figura 3.6 muestra ejemplos de ábacos obtenidos, donde se observa la variación del FS en función de las diversas combinaciones de parámetros relacionadas con la inclinación, la altura y los ángulos de fricción interna.

Para obtener el FS de una manera más intuitiva y rápida, se establecieron 5 posibles niveles freáticos en el interior del talud y para cada uno de ellos se elaboró una tabla de estimación del índice FS (Fig. 3.7) en función de sus características geométricas y mecánicas.

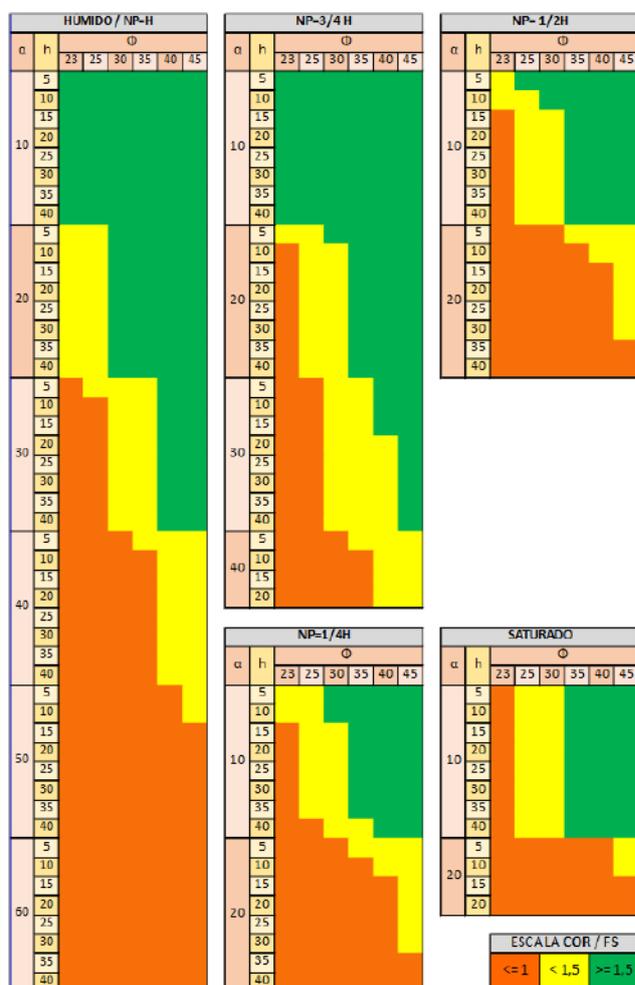


Figura 3.7 Tablas de estimación del FS de acuerdo con las características físicas de la ladera o talud.

Para utilizar las fichas es necesario conocer los parámetros de resistencia al corte del material. Este parámetro debe determinarse mediante pruebas de campo, ensayos de laboratorio (pruebas triaxiales, pruebas de corte directo, etc.) o mediante su estimación empírica. En el siguiente apartado se expone un procedimiento que permite estimarlo empíricamente.

3.5. Valores característicos de cohesión y fricción interna en suelos volcánicos

Los suelos volcánicos tienen un comportamiento geotécnico particular ya que generalmente, los materiales tienen baja densidad de partículas sólidas y baja densidad seca. En cambio, muestran un alto índice de porosidad. La densidad de las partículas sólidas varía entre 2.26 y 2.90, y la densidad seca varía de 5 a 13 kN / m³. La porosidad varía entre 50 y 80%, y el índice de vacío varía de 1.02 a 3.87 (Amaral, 2010). El componente fino generalmente no muestra plasticidad o es poco plástico y la mayoría de los depósitos tienen un bajo contenido de arcilla (<12%).

Amaral (2010) realizó varias pruebas de corte directo del tipo consolidado y drenado. Los resultados obtenidos mostraron dos familias distintas de condiciones de ruptura, con ángulos de fricción interna efectivos (ϕ') entre 30°-35° para suelos limosos arenosos y 35°-43° para suelos arenosos. La cohesión efectiva (c') varía de 0 kPa a 9 kPa.

Como parte de este proyecto, se caracterizaron los valores de resistencia al corte de depósitos piroclásticos pomíticos e ignimbritas no soldadas obtenidos mediante ensayos de compresión triaxiales. Los valores para los ángulos de fricción interna variaron entre 33° y 42° y los valores de cohesión efectiva variaron entre 0 y 24 kPa. Los valores más altos encontrados para los parámetros de resistencia al corte se refieren a piezas de ignición soldadas altamente alteradas.

El cuadro 3.2 presenta el rango de valores de los parámetros de resistencia al corte para diferentes productos volcánicos encontrados en el archipiélago de Azores.

Litología	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)
CP	0 - 6	30 - 37
Lap/PP	0 - 2	36 - 43
DV	0 - 9	25 - 39
INS	16-24	35-37

Cuadro 3.2 Valores de c' y ϕ' para diferentes materiales volcánicos de las Azores. CP - cenizas pomíticas; Lap / PP - arena y gravilla pomíticas; DV - depósitos; INS - ignimbritas no soldadas.

En la literatura técnico-científica (p. Ej., Lupini et al., 1981) se presenta una gran cantidad de correlaciones entre la resistencia al corte y las propiedades del suelo (tamaño de grano, límites de Atterberg), densidad, presión de confinamiento, SPT y CPT. .

Teniendo en cuenta las caracterizaciones físicas y mecánicas obtenidas por Amaral (2010) y las obtenidas en este proyecto a través de ensayos de compresión triaxial, se establecieron correlaciones entre diferentes parámetros básicos del suelo (por ejemplo, la distribución granulométrica).

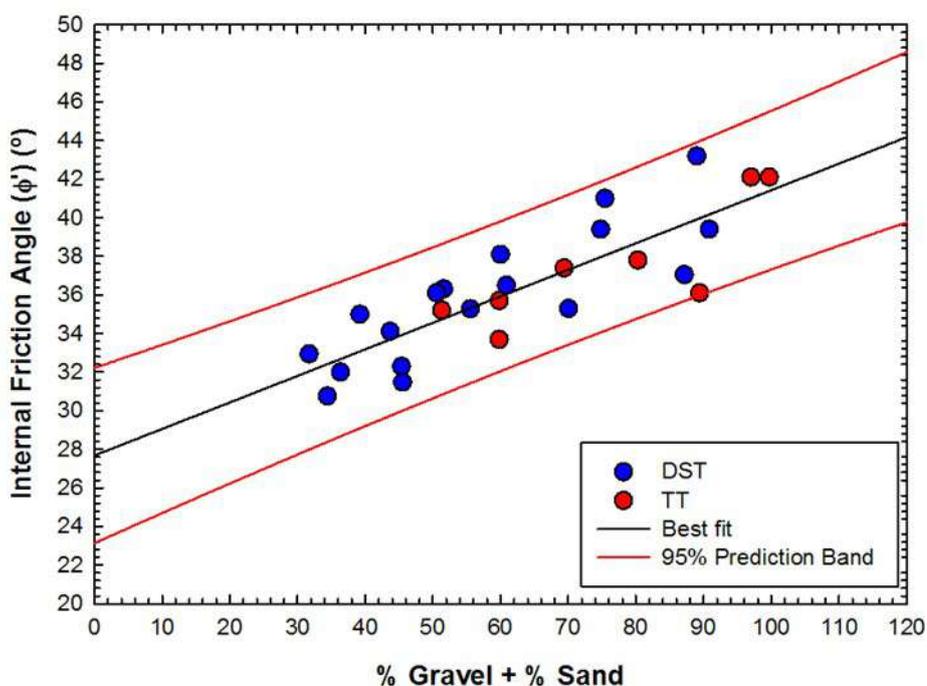


Figura 3.8 Variación del ángulo de fricción con la suma de los porcentajes de grava y arena. STD (prueba de corte directo) - TT (prueba triaxial).

La Figura 3.8 muestra la correlación obtenida entre el ángulo efectivo de fricción interna y la suma del porcentaje de arena y grava, que se expresa mediante la expresión (1), con un coeficiente de correlación del 71%.

$$\phi' = 0,138 (\% \text{ grava} + \% \text{ arena}) + 27,7 \quad (\text{eq.1})$$

donde ϕ' es el ángulo de fricción interna.

La expresión (1) permite obtener el ángulo de fricción interna a partir de un análisis granulométrico simple, que puede realizarse fácilmente en el laboratorio o incluso en el campo. Por lo tanto, los resultados obtenidos pueden usarse para analizar la estabilidad de una ladera de manera simple y rápida.

3.6. Franjas de afección en coronación y a pie de talud

La aparición de fenómenos de inestabilidad geomorfológica en laderas, taludes o acantilados provoca el movimiento de materiales, por efecto de la gravedad hacia su base. Dependiendo de la situación de la zona de iniciación y de su evolución ascendente, en la zona de deflacción puede producirse una ruptura en el terreno que genere una retirada del material en la coronación del talud que provoque su descabezamiento.



Figura 3.9 Ejemplo de un deslizamiento. A la izquierda, la ladera inestable, en el centro la retirada del material en coronación y a la derecha la propagación, en el pie de los materiales movilizados.

Para este trabajo, se realizó un análisis estadístico de varios casos de inestabilidades, en los que fue posible obtener información sobre el retroceso sufrido en la parte superior de la ladera y la distancia horizontal recorrida por los materiales después del deslizamiento. Esta información obtenida y su comparación con las características morfométricas de las laderas permitieron verificar la existencia de relaciones entre la altura y la distancia de retroceso y propagación de la inestabilidad.

La delimitación de zonas de riesgo determinadas a través del conocimiento de las características morfológicas de los taludes pueden servir como base para la definición de franjas de afección cuya delimitación puede ser extremadamente importante en la gestión del riesgo y la planificación territorial, particularmente en una región como las Azores.

Por lo tanto, la franja de riesgo en coronación representa la zona de ruptura probable, es decir, la distancia de potencial retroceso de la parte superior de la ladera en caso de inestabilidad. La franja de riesgo en pie de talud representa la zona de potencial propagación de los materiales después de producirse la inestabilidad.

a) FRANJAS SUPERIORES DE RIESGO Y PROTECCIÓN (FRT y FPT)

Tras un proceso de recopilación y análisis de los efectos causados en la coronación de una serie amplia de laderas, se concluyó que existe una relación entre la altura del elemento y el descabezamiento observado. En el gráfico de la figura 3.10 se puede observar los datos estudiados con los cuales se estableció una línea de tendencia, en rojo en el gráfico, definida por la expresión que define el rango de riesgo de FRT, dada por la expresión (2).

$$FRT = 0,65 \cdot h \tag{eq. 2}$$

Para determinar el rango de protección FPT se aseguró un intervalo de confianza del 95% obteniendo la línea de tendencia verde en el gráfico y definido por la expresión (3)

$$FPT = 1,3 \cdot h \tag{eq. 3}$$

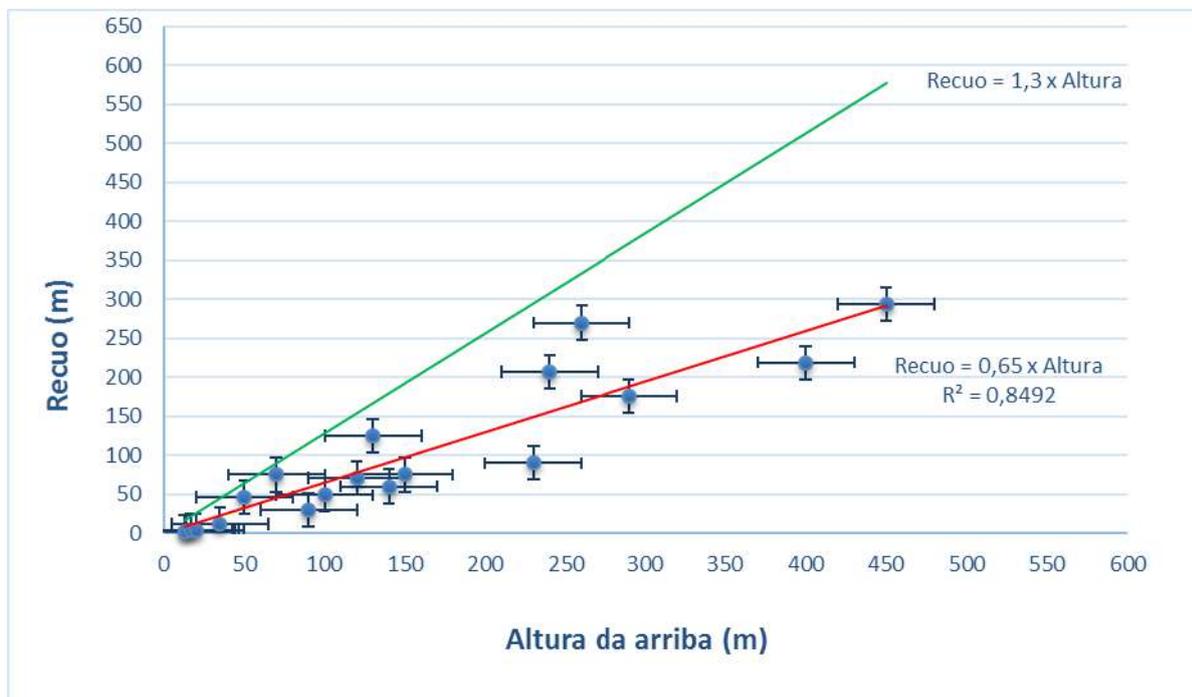


Figura 3.10 Gráfico de la relación entre la altura de la ladera y la distancia de retroceso en coronación.

b) FRANJAS DE RIESGO Y PROTECCIÓN EN EL PIE (FRB y FPB)

De manera similar se realizó el mismo proceso para las bandas de riesgo y protección en la base de los taludes y laderas estudiados. Y se observó que también es posible establecer una relación entre la altura de la ladera y la distancia horizontal recorrida por los materiales movilizados, tanto por procesos de deslizamiento como de escorrentía.

Sin embargo, se observaron importantes diferencias entre las distancias cubiertas para los terraplenes en función de que su altura fuese superior o inferior a 100 m de altura, lo que se traduce en un efecto de escala motivado por la tipología de la inestabilidad. Por lo que se ha observado, hay un rebote de 100 m hacia arriba, en la transición de deslizamientos de tierra a flujos detríticos.

En el gráfico de la figura 3.11 se puede ver que hasta una altura de 100 m la relación entre la altura y la distancia horizontal cubierta es aproximadamente 1:1, llegando a ser aproximadamente 1: 1,5 después de esta altura.

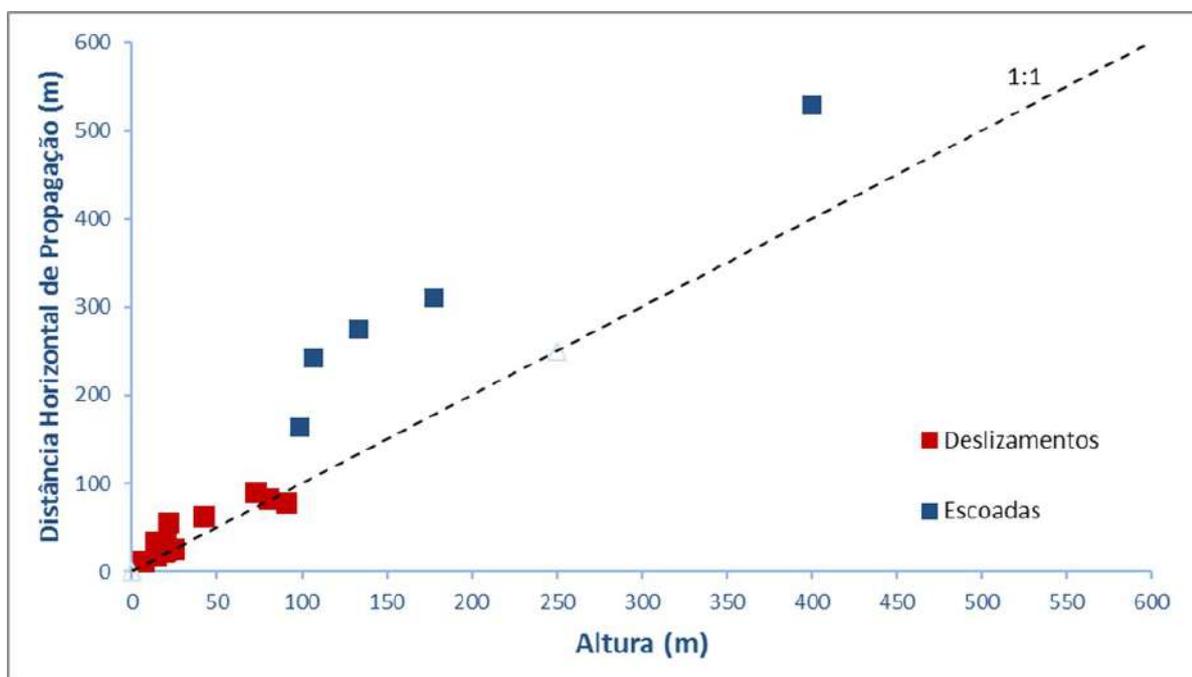


Figura 3.11 Relación entre la altura y la distancia horizontal de propagación en la base, con diferenciación de deslizamientos de tierra y flujos detríticos. La línea discontinua define una relación 1: 1.

Por lo tanto, se decidió definir dos bandas de riesgo y protección en la base, FRB y FPB, dependiendo de que la altura de la ladera superara o no los 100m. Estas bandas de riesgo y protección se obtuvieron de la misma manera que para la coronación.

En la figura 3.12 se pueden observar las rectas obtenidas para cada franja y las expresiones (4) y (5) definen, respectivamente, las bandas de riesgo y protección de la base en una ladera con una altura inferior a 100 m.

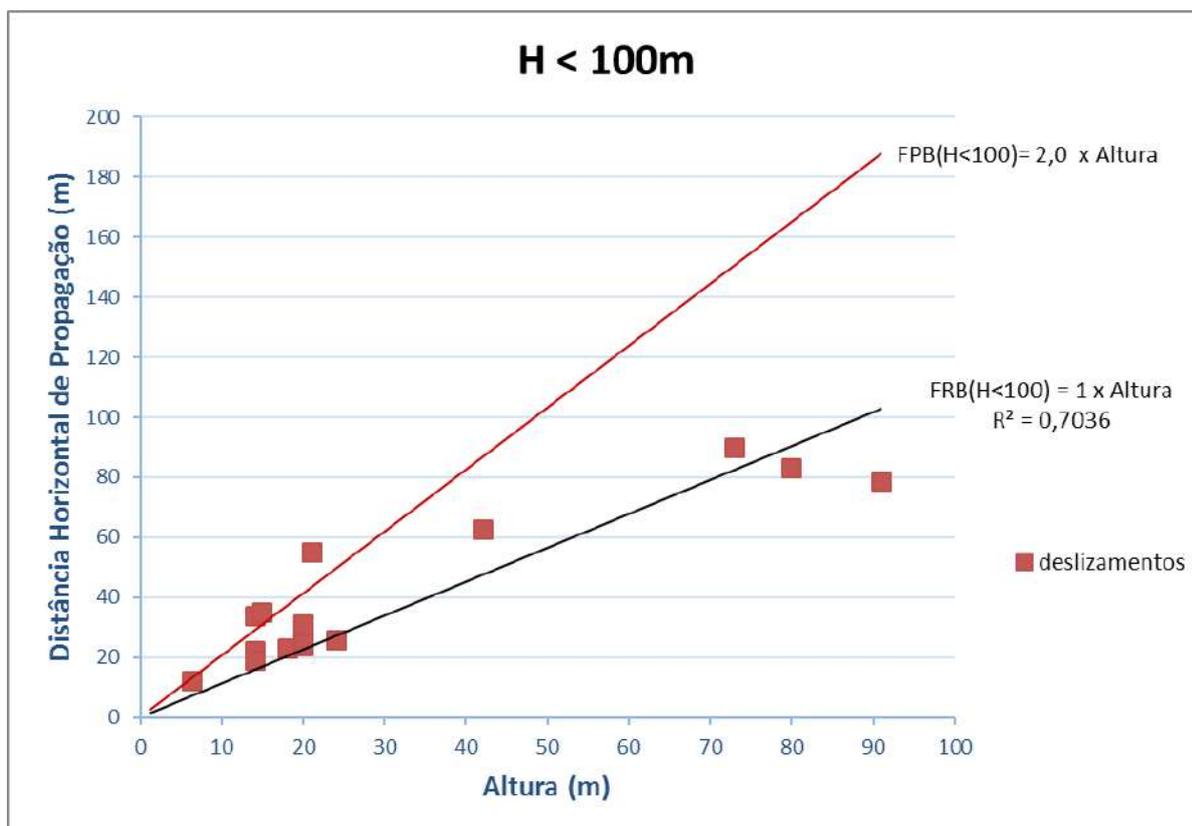


Figura 3.12 Gráfico de la relación entre la altura inferior a 100 m y la distancia horizontal cubierta.

$$FRB = 1 \cdot h$$

Para taludes o laderas con $h < 100$

(eq. 4)

$$FPB = 1,5 \cdot h$$

Para taludes o laderas con $h < 100$

(eq. 5)

En la figura 3.13 se pueden observar las rectas obtenidas para laderas con una altura superior a 100 m y las expresiones (6) y (7) definen las franjas de riesgo y protección del pie de laderas con una altura superior a 100 m.

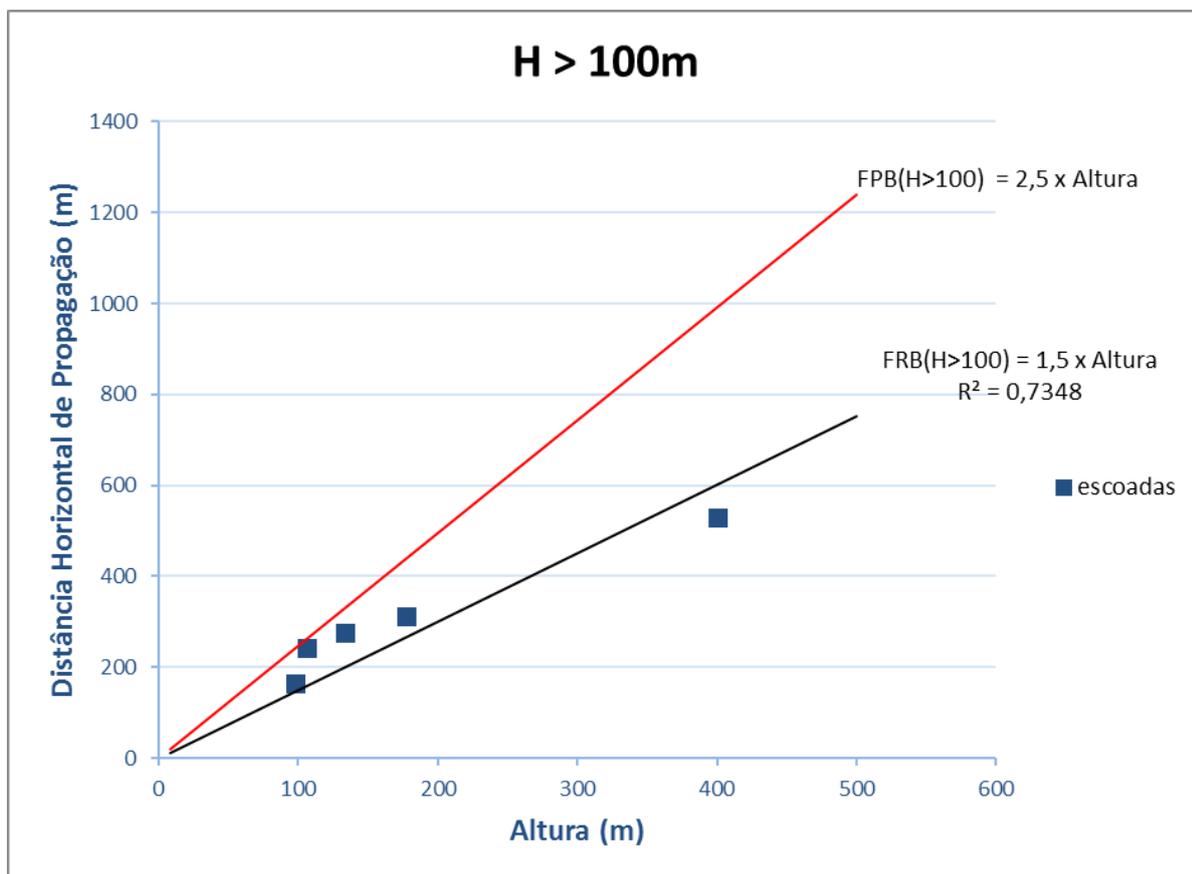


Figura 3.13 Gráfico de la relación entre laderas de altura superior a 100 m y la propagación horizontal cubierta.

$$\mathbf{FRB = 1,5 \cdot h} \quad (\text{eq. 6})$$

Para taludes o laderas con $h > 100$

$$\mathbf{FPB = 2,5 \cdot h} \quad (\text{eq. 7})$$

Para taludes o laderas con $h > 100$

3.7. Consideraciones finales

La inestabilidad de las laderas es un problema que afecta a varios lugares del archipiélago de las Azores, lo que resulta en grandes pérdidas tanto en términos de bienes materiales como de vidas humanas.

A menudo se pide a los técnicos e ingenieros que den su opinión sobre la estabilidad de una ladera, con tiempos incompatibles para llevar a cabo estudios detallados sobre las condiciones mecánicas e hidrológicas de los macizos bajo análisis.

La aplicación de técnicas de análisis de estabilidad de taludes es una herramienta importante para evaluar el estado de estabilidad, ya que permite la determinación de áreas potenciales para el comienzo de rupturas del terreno y, por lo tanto, evaluar la necesidad de implementar medidas de estabilización para evitar y / o minimizar problemas para personas y propiedades.

El objetivo de este trabajo fue obtener una herramienta para apoyar la evaluación de la estabilidad de taludes, que sirviera como un análisis preliminar de las condiciones de estabilidad, esenciales en tiempos de crisis geomorfológicas. La evaluación rápida del estado de seguridad permitirá, en una etapa temprana, determinar el factor de estabilidad y, por lo tanto, la definición de las medidas de seguridad que se adoptarán para evitar la pérdida de bienes materiales y humanos.

Las franjas de riesgo y protección determinadas a través del conocimiento de las características morfológicas de los terraplenes pueden servir como base para la definición de bandas de seguridad, que son extremadamente importantes en la gestión y planificación del territorio, particularmente en una región como las Azores.

Se entiende, por lo tanto, que la información obtenida en este trabajo es una contribución significativa para dar una respuesta rápida a las condiciones de estabilidad de un talud o ladera formada por suelos dada. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que es una herramienta rápida y debe diagnosticarse inmediatamente con mayor precisión a través de pruebas de laboratorio para determinar los parámetros de resistencia al corte y con el uso de métodos de análisis de estabilidad, ya sea mediante técnicas de equilibrio límite o mediante Análisis de tensión / deformación.

CAPÍTULO 4. Estudio geológico y geotécnico.

A partir de las conclusiones del diagnóstico previo se deberá decidir en qué casos es necesario llevar a cabo un estudio más detallado por personal cualificado y su prioridad. Este estudio tendrá como objetivo ofrecer un diagnóstico sobre la estabilidad del talud o ladera y, en caso de que se estimara conveniente, realizar un análisis de riesgos e incluso llegar a proponer las soluciones más adecuadas para resolver el problema o también medidas cautelares de restricción de acceso y cierre temporal de la zona afectada.

En los casos más evidentes y en aquellos en los que el responsable de gestionar el riesgo de estas posibles inestabilidades disponga de la suficiente experiencia, puede no ser necesario realizar un diagnóstico previo y el proceso podrá comenzar directamente en una fase de estudio más detallado del análisis de la estabilidad de la ladera o talud que deberá responder al contenido que se indica en este capítulo. Si dispone de la información necesaria, este estudio geológico y geotécnico también podrá servir, en su caso, para la elaboración del correspondiente análisis de riesgos así como el diseño de las soluciones oportunas.

Para abordar este estudio con las suficientes garantías se debe recabar la información previa relevante sobre el talud de la que se pueda disponer, realizar una serie de visitas de campo que tendrán como objeto conocer el estado y comportamiento del macizo así como las condiciones de contorno que pueden afectar a su estabilidad.

Es habitual que el diagnóstico de la estabilidad, y también el posible análisis de riesgos posterior, se sustenten en la aplicación de alguna clasificación geomecánica. La experiencia en la Macaronesia nos indica que en los terrenos volcánicos tienen difícil encaje este tipo de herramientas por no tener en cuenta las singularidades que presentan estos territorios. En esta Guía se propone la utilización alternativa de varias herramientas:

- La Clasificación VSR (Clasificación Geomecánica para Taludes en Rocas Volcánicas) para analizar la estabilidad del talud y, posteriormente, la Clasificación VRHRS (Volcanic Rockfall Hazard Rating System) que se recomienda utilizar para evaluar el riesgo cuando el elemento a proteger está en movimiento y atraviesa la zona de riesgo durante unos instantes. Esta metodología se expone en los Anejos IV y VI respectivamente del documento.

- Y la Clasificación IRTV (Índice de Riesgo de Taludes en materiales Volcánicos), para zonas en las que el elemento a proteger no se mueve o permanece en ellas durante periodos prolongados de tiempo, a cuya metodología se dedica el Anejo V de esta Guía.

4.1. Información previa y antecedentes:

Se trata de recopilar la información documental que permita realizar un primer acercamiento a la comprensión del problema considerando las circunstancias que puedan estar afectando al comportamiento del talud o ladera y preparar las herramientas que permitan realizar una toma de datos ordenada y eficiente que facilite el trabajo que deberá realizarse a continuación. Esta información previa consistirá, al menos, en la siguiente:

- a) Recopilación y análisis de los estudios existentes de la zona que sean de interés en el ámbito del estudio.
- b) Historial de eventos relativo a inestabilidades acaecidas en la zona de estudio. Se deberá registrar la fecha de cada siniestro y una descripción del mismo categorizando de alguna manera el tamaño del material movilizado por la inestabilidad.
- c) Recopilación y/o elaboración de herramientas cartográficas que representen adecuadamente el elemento a estudiar, permitan tomar notas y representar gráficamente lo observado in situ por el técnico especialista. Deberá ofrecer el detalle adecuado para el trabajo que se va a desarrollar, que en todo caso, para desprendimientos de rocas deberá tener una escala mínima 1:1000 y para taludes de desmonte 1:500 (o incluso menor en función de sus dimensiones)

También deberá disponerse de los mapas geológicos-geotécnicos existentes de los que se obtendrá información sobre las unidades geotécnicas presentes en el ámbito y las propiedades mecánicas de los materiales presentes.

- d) En función del tipo de inestabilidad y de las circunstancias de los elementos a proteger deberá dotarse de las fichas de campo y otras herramientas que faciliten la recopilación sistemática de toda la información relevante para el posterior desarrollo del trabajo.
- e) Identificación de factores desencadenantes. Deberán identificarse y evaluarse aquellos factores desencadenantes de inestabilidades con mayor probabilidad de ocurrencia en el caso estudiado.

- f) Programación de la campaña. Deben organizarse las actividades que se desarrollarán sobre el terreno teniendo en cuenta aquellas que, sin ser necesario llevar a cabo a corto plazo en el diagnóstico de la estabilidad, puedan ser necesarias para las fases de análisis de riesgos o diseño de soluciones de manera que se disponga de la información necesaria en el momento en que se precise para redactar el correspondiente estudio.

4.2. Trabajos de campo:

Para conocer la situación en que se encuentra el talud o ladera se realizarán tantas visitas de campo y campañas de reconocimiento como sean necesarias para recopilar la información suficiente para redactar un Informe Geológico y Geotécnico que recoja convenientemente los contenidos mínimos que se indican en el apartado 4.3 de este documento. Esta campaña de campo incluirá la toma, registro y desarrollo sobre el terreno de los siguientes aspectos:

a) Trabajos en detalle de reconocimiento y análisis del terreno, utilizando las herramientas cartográficas, con los siguientes objetivos:

- Caracterización geológica-geotécnica de los materiales que conforman el talud o la ladera.
- Identificación y análisis de discontinuidades que puedan originar inestabilidades o roturas parciales, ayudados en su caso mediante el uso de la proyección estereográfica (rumbo y buzamiento de las diaclasas)
- Identificación, localización y delimitación cartográfica tanto de las áreas fuente como de las cuencas vertientes.
- Evaluación de los tamaños de bloques o el volumen de materiales susceptibles de caer.
- Descripción de los posibles mecanismos de rotura y del área que podría ser afectada.
- Si fuera necesario, se realizarán levantamientos topográficos y taquimétricos con el detalle preciso para estudiar correctamente el problema los cuales deberán permitir elaborar, en su caso, los perfiles geotécnicos que se utilizarán para realizar simulaciones informáticas.

b) Sectorización: en aquellos tramos en los que pueda considerarse un comportamiento homogéneo en base a sus características geotécnicas, geometría, volúmenes potencialmente inestables, mecanismos de rotura y áreas de afección, deberá recabarse la información necesaria para poder valorar la conveniencia de hacer una sectorización del ámbito de estudio.

c) Estaciones geomecánicas con toda la información necesaria para aplicar, en los sectores definidos, las herramientas de diagnóstico de la estabilidad del talud o ladera que se recogen en esta Guía y, en su caso, la posterior evaluación o análisis de riesgo que corresponda. Para ello se podrán utilizar las fichas de toma de datos sobre el terreno que tiene asociada cada una de estas herramientas.

Y, en su caso, también deberán obtenerse los parámetros geotécnicos que condicionan el comportamiento mecánico de la superficie durante los impactos y resultan necesarios para el adecuado cálculo y diseño de soluciones.

d) Hidrología y drenaje del talud o ladera: se deberán identificar y localizar los cauces o barrancos que discurran en el ámbito de estudio así como aquellas zonas erosionadas por la circulación o acumulación de las escorrentías superficiales durante los episodios de lluvia. Así mismo, se deberán detectar las zonas con acumulación de acarreo y detritos o con encharcamientos visibles que indiquen saturación del terreno o surgencias de agua.

e) Si fuera preciso, también se planificará una campaña de prospecciones y ensayos en laboratorio para lo que se tomarán las muestras necesarias.

4.3. Contenido del informe geológico y geotécnico:

El alcance de este informe será el necesario y suficiente para valorar y parametrizar las condiciones geológicas y geotécnicas relevantes del caso que se estudia de cara a obtener un adecuado diagnóstico y, en su caso, a su posterior utilización en el diseño de las soluciones y medidas de estabilización y protección que sean precisas.

El informe geológico y geotécnico deberá utilizar como fundamento la información indicada anteriormente para desarrollar el siguiente contenido mínimo:

a) **Objeto:** debe identificarse la zona de estudio y definirse claramente el objeto del informe que podrá consistir en ofrecer un diagnóstico sobre la estabilidad de los taludes o laderas localizados en la zona de estudio, llevar a cabo el correspondiente análisis de

riesgos o incluso proponer las soluciones más adecuadas para resolver el problema generado por la inestabilidad.

b) **Antecedentes:** En este apartado se recogerá la información disponible sobre el historial de movimientos ocurridos en el área de estudio a lo largo del tiempo. Se prestará especial atención a la información que se estime relevante sobre las circunstancias en las que se hubieran desarrollado inestabilidades así como el alcance y distribución de los elementos caídos y, en todo caso, se incorporarán las conclusiones obtenidas de estudios existentes.

Se describirán también las condiciones climáticas e hidrológicas concretas de la ladera y toda la información recabada sobre los factores que pudieran resultar desencadenantes:

- Régimen de precipitaciones medias anuales de la zona.
- Régimen de vientos, detectando la presencia de determinadas condiciones geomorfológicas que puedan provocar la concentración de corrientes que deban hacer considerar una mayor predominancia de la influencia de este factor en el desenlace de una inestabilidad.
- Hidrología y drenaje. Se estudiará la posible influencia de cauces y barrancos y sus cuencas vertientes en la zona a estudiar. Se deberá recopilar la información disponible sobre los caudales de avenida para distintos periodos de retorno.
- Consideraciones debidas a sismos. Sobre taludes o laderas que requieran alta seguridad ante caída de rocas, se recomienda realizar un análisis de estabilidad del mismo de acuerdo con los datos sísmicos que sea más recomendable aplicar en esa localización.

c) **Características geológicas y geotécnicas de los materiales:** se identificarán las distintas unidades geológicas, definiendo su litología, disposición, geometría, potencia y estructuras geológicas asociadas. Se describirán los aspectos geomorfológicos e hidrogeológicos de la ladera que puedan condicionar la estabilidad de la misma. Se indicarán y definirán las unidades geotécnicas involucradas asignando a cada una de ellas los parámetros geomecánicos correspondientes, necesarios para el cálculo geotécnico y el diseño de las soluciones, obtenidos a partir de los resultados de los trabajos de campo y de laboratorio.

d) **Localización y caracterización de las inestabilidades y áreas fuente:** mediante un análisis de los condicionantes geológicos, geotécnicos e hidrológicos del área de estudio, se realizará una evaluación del terreno estableciendo el tamaño y volumen aproximado de materiales susceptibles de sufrir movimientos, su origen y posibles mecanismos de rotura.

En el caso de preverse que la inestabilidad se desarrolle mediante desprendimientos de rocas, se identificarán, delimitarán cartográficamente y se caracterizarán tanto la cuenca vertiente como las distintas áreas fuente potenciales de desprendimientos. Esta información se podrá incorporar a un plano clinométrico que permitirá alcanzar un mejor conocimiento de la situación y facilitará la toma de decisiones sobre una posible sectorización de la zona de estudio.

Para cada uno de los sectores finalmente definidos deberá detectarse el bloque pésimo o de mayor tamaño con potencial riesgo de caída o inestable, así como aquellos de menor tamaño que de forma recurrente o periódica tienden a desprenderse y caer.

e) **Sectorización y diagnóstico de la estabilidad:** en base a la localización de las áreas fuente y demás características geotécnicas y geométricas estudiadas sobre el terreno se analizará la conveniencia de realizar una sectorización del área de estudio en función de que en los sectores definidos se presente o se pueda prever un riesgo similar y/o unas soluciones comunes.

Deberá realizarse un diagnóstico individualizado de la estabilidad de cada sector, para lo que se recomienda la utilización de la clasificación VSR, específica para terrenos volcánicos que se detalla en el Anejo IV de esta Guía.

f) **Definición de los elementos a proteger:** se identificarán los elementos que podrían ser afectados por los efectos de los movimientos de masas de suelo y/o roca que puedan producirse.

En función del objeto del estudio podrá ser necesario realizar un análisis del nivel de riesgo de cada sector así como plantear soluciones de distinta tipología en función de las circunstancias particulares de cada uno de acuerdo con los distintos niveles de riesgo que hayan podido ser estimados.

En esta Guía se distinguen dos tipos de zonas en función de que los elementos a proteger se encuentren en movimiento o permanezcan en la zona de riesgo durante cierto

tiempo y para cada una se propone una metodología de análisis de riesgo diferente: el VRHRS para la primera (Anejo VI del documento) y el IRTV para la segunda (Anejo V).

-Zonas de tránsito: Se trata de elementos de carácter lineal constituidos por vías para tráfico rodado de diferentes geometrías y secciones por las que circulan vehículos con diferentes velocidades y densidad, así como vías de comunicación peatonales.

-Zonas de permanencia: constituidas por perímetros que delimitan superficies en las que individuos o grupos de personas permanecen durante ciertos períodos de tiempo. Incluyen zonas cerradas como edificios e instalaciones industriales localizadas en el interior de naves y zonas de permanencia abiertas, que se encuentran al aire libre como puede ser el caso de áreas de recreo, playas e instalaciones industriales a cielo abierto.

g) **Modelización de trayectorias**: si resulta procedente, se realizará una primera modelización de trayectorias mediante herramientas informáticas que permitan conocer el grado de afección o exposición de los elementos a proteger.

h) **Conclusiones y recomendaciones**: se realizará un análisis de todos los resultados e información anterior a partir del cual se redactará un documento de conclusiones y recomendaciones que satisfaga el objeto que se haya establecido para el informe.

i) **Anexos**: el informe llevará adjunta la documentación que se estime necesaria para complementar la información que contiene el documento, entre la que se podría mencionar:

- Documentación gráfica de soporte como reportajes fotográficos
- Mapa geológico general a escala mínima 1:25000
- Mapa clinométrico con áreas fuente y delimitación de cuencas vertientes a escala mínima 1:1000
- Mapa y perfiles geológicos de detalle, cartografía a escala mínima 1:1000
- Mapa geotécnico de detalle, escala mínima 1:1000
- Registros de estaciones geomecánicas
- Columnas litológicas de sondeos
- Resultados de ensayos in situ y de laboratorio
- Perfiles principales por área fuente para la modelización de trayectorias de caída de rocas
- Registros climatológicos, sísmicos, etc.

CAPÍTULO 5: Análisis de riesgos por desprendimiento

Una vez se ha diagnosticado la estabilidad del talud en el estudio geológico geotécnico, también puede requerirse la realización de un análisis de riesgos que valore las pérdidas potenciales que podría ocasionar el desencadenamiento de una inestabilidad en el talud. Este análisis permitirá tomar decisiones priorizando las actuaciones en aquellos elementos o sectores que evidencien un mayor riesgo. El análisis de riesgos requiere conocer la peligrosidad del talud o ladera, la vulnerabilidad del elemento a proteger y los costes o pérdidas derivados del peligro.

Para ello se puede optar por aplicar procedimientos cualitativos o cuantitativos, en función de los objetivos que se persigan y el alcance de sus resultados. Los métodos cualitativos son recomendables cuando el objetivo sea obtener una aproximación orientativa del grado de riesgo, adecuado en los análisis preliminares ya que pueden ser útiles para estimar si en principio el nivel de riesgo puede ser alto, medio o bajo, permitiendo la zonificación y priorización donde el riesgo sea más alto. Por el contrario, cuando se trate de establecer el riesgo específico para un elemento determinado con el fin de diseñar medidas de protección, se deben utilizar métodos cuantitativos que calculan de forma numérica la peligrosidad y el riesgo de cada elemento vulnerable.

En este capítulo se expone una metodología para el análisis de riesgos frente a desprendimientos de rocas que, como ya se apuntó en el capítulo anterior, propone un tratamiento diferente para los elementos que están sometidos a riesgo en zonas de tránsito y para los que se encuentran en zonas de permanencia.

En el primer caso los vehículos estarán sometidos al riesgo durante el tiempo que tardan en atravesar la zona afectada por el talud. Para ello se propone una metodología cualitativa a través de la clasificación Volcanic Rockfall Hazard Rating System (VRHRS) que se desarrolla en el Anejo VI de este documento.

Para las zonas de permanencia, que están constituidas por perímetros cubiertos o a cielo abierto en los que individuos o grupos de personas permanecen expuestos al riesgo durante períodos de tiempo relativamente prolongados, se han planteado dos metodologías para analizar el nivel de riesgo: una cuantitativa cuyos fundamentos se exponen en el apartado 5.2. y otra cualitativa que se desarrolla mediante el índice IRTV a cuyo procedimiento se dedica el Anejo V de esta Guía.

5.1. Zonas de tránsito.

El análisis de riesgo en zonas de tránsito parte de la aplicación de la clasificación VSR que diagnostica la estabilidad del talud. A partir de este parámetro se calcula el índice VRHRS básico sobre el que se aplica un factor de ajuste por peligrosidad y un factor de ajuste por exposición.

$$VRHRS_{\text{básico}} = 200 \cdot e^{-0,034 \cdot VSR} \quad (5.1)$$

$$VRHRS = VRHRS_{\text{básico}} + F_1 + F_2 \quad (5.2)$$

siendo F1 y F2 los factores de ajuste por peligrosidad y por exposición respectivamente.

5.1.1. Ajuste por peligrosidad.

Este ajuste, a partir del nivel de estabilidad del talud, trata de introducir en el análisis de riesgos los factores que puedan influir en que aumente la probabilidad de que se produzca el desprendimiento y de que sus efectos sean más o menos severos.

Los parámetros que se tienen en cuenta como factores que afectan a la probabilidad de ocurrencia son:

- El clima y la presencia de agua en el talud.
- El historial de eventos o caídas de bloques.

Los parámetros que pueden influir en la intensidad de las consecuencias del desprendimiento:

- La altura del talud.
- La efectividad de la cuneta de recepción.
- La anchura de la calzada incluido el arcén.
- El tamaño del bloque o el volumen de las rocas que pueden ser desprendidas.

5.1.2. Ajuste por exposición.

Este ajuste valora la probabilidad que tiene un vehículo de ser afectado por el desprendimiento en función del tiempo que permanece en la zona de riesgo y también

valora, dado que se encuentra en movimiento, las posibilidades que tiene de evitarlo. Utiliza dos parámetros:

- El riesgo medio vehicular.
- El porcentaje de visibilidad.

Como ya se ha indicado, en el Anejo VI se definen todos estos parámetros y se describe la metodología precisa para realizar los correspondientes cálculos con los que finalmente se podrá lograr una valoración del riesgo que permitirá decidir sobre la necesidad de realizar una actuación más o menos inmediata sobre el talud estudiado o establecer planes de acción dando prioridad a aquellos sectores que presenten un mayor riesgo.

5.2. Zonas de permanencia.

Para zonas de permanencia como viviendas, núcleos urbanos, zonas recreativas e instalaciones, se ha desarrollado el índice IRTV específico para taludes en materiales volcánicos, cuya descripción se incluye en el *Anejo V* de esta Guía. Se trata de un método cualitativo que ofrece una estimación preliminar del riesgo.

Para un cálculo preciso del riesgo y en el caso de que la aplicación del IRTV de cómo resultado la necesidad de realizar un estudio más detallado, será necesario calcular el riesgo de forma cuantitativa, para ello, el Comité Técnico Conjunto JTC1 (*Joint Technical Committee*) formado por las 3 sociedades internacionales de Geoingeniería (*ISSMGE, ISRM y IAEG*), ha elaborado unas recomendaciones para calcular el riesgo cuantitativo por deslizamientos de laderas y taludes, que incluyen la caída de rocas, denominado *QRA (Quantitative Risk Assessment)*, Fell et al, 2005 y Corominas et al, 2005. El procedimiento consta de 4 pasos fundamentales:

- 1) Análisis de la peligrosidad de caída de rocas a partir de la relación frecuencia-magnitud de los eventos ocurridos en el área de estudio ($P_{(L)}$)
- 2) Estimación de la probabilidad de que la caída de rocas afecte a edificios o personas al pie del talud ($P_{(T,L)}$).
- 3) Determinación de la vulnerabilidad de los elementos expuestos valorando la probabilidad espacio-temporal del elemento expuesto y su vulnerabilidad ($P_{(S,T)}$ y $V_{(prop,S)}$).
- 4) Determinación de la eficiencia de las barreras para retener las rocas y cálculo del riesgo residual debido a aquellos bloques capaces de superar las barreras.

5.2.1. Análisis de la peligrosidad

La peligrosidad se refiere a la probabilidad de ocurrencia de un proceso (caída de rocas) con un nivel determinado de intensidad o severidad, dentro de un período de tiempo dado y un área específica. Para su evaluación es necesario conocer: dónde y cuando ocurrieron los procesos en el pasado, la intensidad y magnitud que tuvieron, y la frecuencia de ocurrencia. Este último punto solo puede ser estimado si se conocen las pautas temporales del proceso (período de retorno) a partir de datos y series históricas, o de los factores que los desencadenan. Para obtener esta información y otras referentes a las condiciones geomorfológicas, climáticas etc., se remite al estudio geológico y geotécnico. Los procedimientos de análisis se basan en métodos probabilísticos mediante relaciones entre número de eventos y pautas temporales, tamaño de bloques y su frecuencia, etc. El análisis de la distribución de eventos mediante relaciones tipo Gutenberg-Richter permite obtener los periodos de retorno o frecuencias, y calcular la probabilidad.

Para realizar el análisis de la peligrosidad de caída de rocas a partir de la relación frecuencia-magnitud de los eventos ocurridos en el área de estudio ($P_{(L)}$) será necesario calcular la probabilidad de caída para cada tamaño característico del talud en función del periodo de retorno de eventos ocurridos en el pasado. Se recomienda agrupar los acontecimientos registrados en los siguientes tamaños (ver Cuadro 5.1), aunque cada caso deberá ajustar esta clasificación a sus necesidades:

Cuadro 5.1. Clasificación de tamaños de bloque sugerida.

<0,5m ³	0,5-1 m ³	1-5 m ³	5-10 m ³	>10 m ³
--------------------	----------------------	--------------------	---------------------	--------------------

Se trata de obtener una probabilidad anual de caída de rocas para cada uno de los intervalos de tamaño identificados mediante la siguiente expresión:

$$P_{(L)} = N^{\circ} \text{ eventos registrados} / \text{años} \tag{5.3}$$

5.2.2. Estimación de la probabilidad de afección.

En primer lugar podrá verificarse mediante el procedimiento rápido que se propone a continuación que existe la posibilidad de que los elementos que se desean proteger

pueden verse alcanzados por los efectos de un posible movimiento de ladera o talud y, en caso de confirmarse, deberá estimarse esta probabilidad de una manera más precisa.

A partir de procedimientos empíricos se han desarrollado criterios que permiten estimar el máximo alcance (run out) que un bloque puede alcanzar desde su punto de origen hasta su parada. Hung y Evans, (1988), definen lo que denominan como “ángulo de sombra” a partir de la proyección de un ángulo de $27,5^\circ$ desde el comienzo del denominado *talus* (ver Figura 5.1), hasta su intersección con el punto de parada. Considerando que dicha zona es la que queda expuesta al riesgo por caída de rocas. Este criterio solo es aplicable al modelo de talud que se presenta en la Figura 5.1.

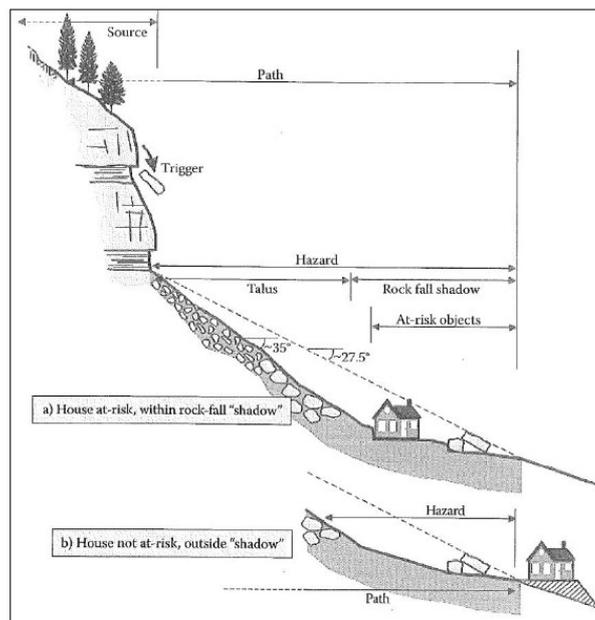


Figura 5.1. Riesgo de desprendimientos para una casa situada a pie de un talud: sin riesgo (a) y con riesgo (b) (Wyllie, 2014).

Con el objeto de verificar la validez de este criterio, se ha realizado un análisis retrospectivo que ha confirmado que la gran mayoría de las rocas quedan comprendidas dentro de la zona de sombra de $27,5^\circ$ establecida, sin embargo, algunos bloques la sobrepasan, por lo que se propone adoptar un ángulo de 25° que corresponde al 100% de los bloques caídos en la zona de estudio que, por otra parte, representa un factor de seguridad adicional sobre los $27,5^\circ$.

Las trayectorias de caídas de rocas no solo se describen en un plano vertical, sino que pueden sufrir un desvío lateral denominado ángulo de dispersión, habitualmente observable en los abanicos de forma cónica que forman los canchales. Aunque este ángulo de dispersión presenta una amplia variación, se recomienda adoptar los 30° sin dejar de tener en cuenta bloques más pequeños o fragmentos que puedan dispersarse en ángulos mayores.

Una vez comprobada la posibilidad de la afección, la estimación de la probabilidad de que la caída de rocas afecte a edificios o personas al pie del talud ($P_{(T-L)}$) se puede obtener estudiando las posibles trayectorias y los puntos de alcance de los desprendimientos simulados a partir de cada una de las áreas fuente detectadas en el terreno y reflejadas en el estudio geológico geotécnico así como para cada uno de los intervalos de tamaño estudiados en el punto anterior.

5.2.3. Vulnerabilidad.

La vulnerabilidad se refiere al grado de daños o pérdidas potenciales en un elemento o conjunto de elementos expuestos como consecuencia de la ocurrencia de un fenómeno de intensidad determinada.

Para determinar la vulnerabilidad de los elementos expuestos se procederá a valorar la probabilidad espacio-temporal del elemento expuesto y su vulnerabilidad ($P_{(S:T)}$ y $V_{(prop:S)}$). La probabilidad espacio-temporal se refiere al tiempo de exposición en el caso de personas, y a la relación entre la longitud ocupada por el elemento a proteger y la longitud de la línea de desarrollo del talud en el caso de edificaciones o instalaciones, para zonas recreativas se deberá tener en cuenta la densidad de ocupación y el tiempo en el que dichas zonas son accesibles al público.

La vulnerabilidad del elemento expuesto en el caso de edificios o instalaciones dependerá del tipo de edificación, la calidad de su construcción, estructura y los distintos tamaños de bloque esperados. Para su estimación habrá que tener en cuenta todos los condicionantes de cada caso. A modo de aproximación se presenta la Cuadro 5.2 que en ningún caso deberá aplicarse sin adaptar los valores al caso específico que se esté estudiando. Se obtendrá una vulnerabilidad para cada uno de los intervalos de tamaño de bloque identificados.

Cuadro 5.2. Valores guía de vulnerabilidad.

Elementos	Tamaño de bloque	Vulnerabilidad (0-1)
Edificios	$\leq 1 \text{ m}^3$	0,1
	1-5 m^3	0,2
	5- 10 m^3	0,3
	$\geq 10 \text{ m}^3$	0,5-1,0
Personas	Dentro de edificios	0,8
	Fuera de edificios	1,0

5.2.4. Riesgo residual y valoración del elemento expuesto.

El procedimiento propuesto permite su aplicación sobre casos en los que ya existan, sobre el terreno, medidas de protección que se puedan considerar insuficientes. Para ello deberá procederse a estimar el riesgo residual que se considerara en base a la reducida eficacia de las medidas implementadas para retener los efectos de aquellos bloques que se consideren capaces de superar las medidas instaladas. Una vez estimado el riesgo residual se introducirá como un factor más en la expresión 5.4.

Finalmente, la estimación del riesgo debe venir referida a las consecuencias humanas y socioeconómicas que se podrían derivar de un suceso y se evalúa en función de las pérdidas potenciales ocasionadas a los elementos que se pretenden proteger (**E**). Los elementos expuestos pueden ser personas, bienes, propiedades, infraestructuras, servicios o actividades económicas cuyo coste o valor puede expresarse según diferentes criterios: coste de construcción, coste de reparación de los daños causados, valor asegurado, etc., o también mediante los costes derivados de interrupción de vías de comunicación, actividades económicas, servicios, así como el coste social y medioambiental que pueda traer consigo.

5.2.5. Estimación del riesgo.

A partir de la información descrita en los apartados anteriores se calcularán las pérdidas anuales del valor del elemento expuesto, $R_{(prop)}$, y la probabilidad de pérdida de vidas humanas $P_{(LOL)}$, mediante las siguientes expresiones, adaptadas de Fell et al, (2005) para cada intervalo de tamaño de bloque identificado:

$$R_{(prop)} = P_{(L)} \cdot P_{(T:L)} \cdot P_{(S:T)} \cdot V_{(prop:S)} \cdot E \quad (5.4)$$

donde $P_{(L)}$ es la frecuencia de eventos de caída de rocas de determinada magnitud; $P_{(T:L)}$ es la probabilidad de que las rocas alcancen el elemento expuesto; $P_{(S:T)}$ es la probabilidad espacio-temporal del elemento expuesto, que en edificios es la relación entre la longitud ocupada por el edificio y la longitud de la línea de desarrollo del talud; $V_{(prop:S)}$ es la vulnerabilidad del elemento expuesto en relación a la caída de rocas; E es el coste estimado para el elemento expuesto.

La probabilidad anual de pérdida de vidas humanas $P_{(LOL)}$, se calcula de mediante la expresión:

$$L_{(LOL)} = P_{(L)} \cdot P_{(T:L)} \cdot P_{(S:T)} \cdot V_{(D:T)} \quad (5.5)$$

donde $V_{(D:T)}$ es la vulnerabilidad de una persona respecto al riesgo de un evento de caída de rocas; $P_{(L)}$ y $P_{(T:L)}$ se definen en la expresión anterior y $P_{(S:T)}$ es la probabilidad espacio-temporal que en este caso tendrá en cuenta el porcentaje de tiempo de exposición de las personas.

CAPÍTULO 6. Gestión del riesgo

6.1. Análisis de alternativas de sistemas de protección.

La gestión del riesgo se refiere al análisis de soluciones alternativas conducentes a la mitigación y control de caída de rocas, mediante la aplicación de criterios técnicos y económicos, y también aquellos que tengan impacto social y medioambiental. Para ello se deben analizar las distintas alternativas de medidas de estabilización, protección y prevención que de forma individual o combinada, conduzcan al objetivo de la reducción del riesgo. En la figura 6.1 se muestra la metodología detallada para la gestión del riesgo de caída de rocas.

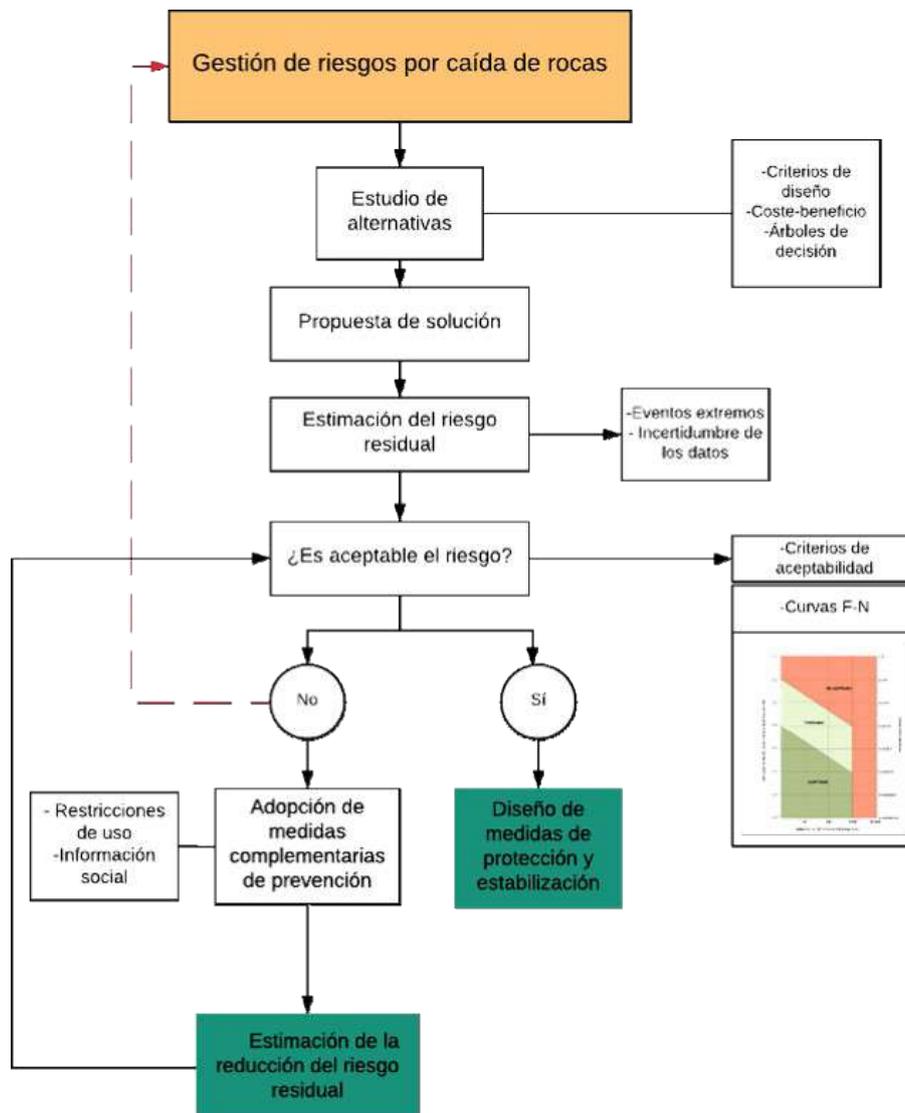


Figura 6.1. Esquema metodológico para la gestión de riesgos aplicado a la caída de rocas.

Para definir la solución más adecuada en cada caso, se deberá realizar un análisis de posibles alternativas que tenga en cuenta los condicionantes económicos, técnicos y los aspectos medioambientales, de manera que puedan identificarse las alternativas que compatibilicen los criterios de aceptabilidad con los de coste-beneficio. Los análisis probabilísticos mediante árboles de decisión permiten combinar distintos factores resultando útiles para la selección de alternativas.

6.2. Tipo de medidas.

Las medidas de estabilización o control para caídas de rocas incluyen tanto medidas activas como pasivas. El objetivo de las primeras es evitar las caídas de rocas mediante la consolidación por refuerzo del macizo rocoso. Las pasivas tratan de evitar que las caídas alcancen al objeto a proteger. En este apartado se exponen a modo orientativo las medidas a utilizar tanto para la estabilización de taludes con problemas de inestabilidad total o parcial (Cuadro 6.1), como para el control de caída de rocas (Cuadro 6.2).

Medidas de estabilización	
Objetivo	Medidas
Disminución de las fuerzas desestabilizadoras	<ul style="list-style-type: none"> ○ Retaluzado ○ Excavación de cabecera
Aumento de la resistencia al corte del terreno mediante el incremento de las tensiones normales en zonas convenientes de la superficie de rotura	<ul style="list-style-type: none"> ○ Tacones de tierra o escollera ○ Bermas intermedias
Aumento de la resistencia al corte del terreno reduciendo presiones intersticiales	<ul style="list-style-type: none"> ○ Drenaje superficial ○ Drenaje profundo
Proporcionar una fuerza contraria al movimiento de la masa deslizante	<ul style="list-style-type: none"> ○ Anclajes ○ Bulonado
Evitar el deslizamiento mediante contención o sostenimiento	<ul style="list-style-type: none"> ○ Muros de contención y sostenimiento ○ Muros pantalla
Evitar el deslizamiento mediante transmisión de esfuerzos a capas estables inferiores	<ul style="list-style-type: none"> ○ Pantallas de pilotes y micropilotes

Cuadro 6.1.Resumen de las distintas medidas activas de estabilización de taludes. (IGME, 1987)

Medidas de protección de caída de rocas	
Objetivo	Medidas
Eliminación del riesgo	<ul style="list-style-type: none"> · Saneos · Excavaciones · Voladuras
Evitar o reducir la erosión y meteorización de la superficie del talud, evitando su degradación y la caída de fragmentos de rocas.	<ul style="list-style-type: none"> · Mallas de guiado · Siembra de taludes · Hormigón proyectado · Canalización de aguas de escorrentía en cabecera y pie del talud.
Evitar la apertura de discontinuidades y posterior rotura del talud.	<ul style="list-style-type: none"> · Anclajes · Bulonado · Atado de bloques · Sistema mixto de cables y mallas · Hormigón proyectado
Interceptar la caída de rocas evitando alcanzar el elemento a proteger.	<ul style="list-style-type: none"> · Barreras flexibles de cables y mallas. · Estructuras de hormigón armado y falsos túneles. · Ménsulas y voladizos. · Zanjas y cunetones. · Terraplenes de tierra armada y bloques prefabricados de hormigón.

Cuadro 6.2.Resumen de medidas para el control de caída de rocas. (Modificado de IGME, 1987)

En el *Anejo VII de este documento* se presenta una descripción mediante fichas de ambos tipos de medidas en las que se indican sus características técnicas, aplicaciones, ventajas e inconvenientes y se dan recomendaciones de uso, aunque para una descripción detallada de las mismas se recomienda el libro de Fonseca, R. (2010).

6.3. Diseño de medidas de protección frente a caída de rocas.

En el caso de que tras realizar el estudio de alternativas valorando los costes y beneficios tanto funcionales como económicos y medioambientales se considerase

que la solución más adecuada consiste en la instalación de medidas de tipo pasivo, para su diseño, se recomienda seguir las indicaciones de la metodología expuesta en el *Anejo VIII* de esta guía.

En la Figura 6.2 se muestran distintos sistemas de protección de caída de rocas en función de su capacidad de absorción energía de impacto.

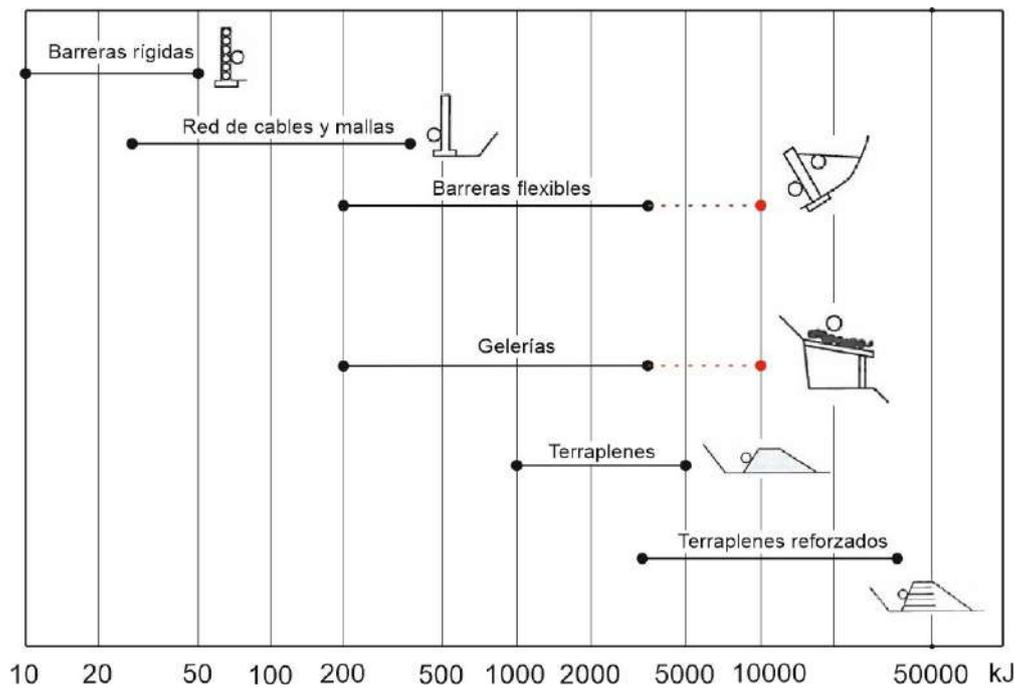


Figura 6.2. Sistemas de protección de caída de rocas en función de su capacidad de absorción de energía de impacto. Modificado de Vogel et al, 2009.

6.4. Riesgo residual.

El riesgo residual se refiere al remanente después de haber adoptado medidas de control, incluso cuando en los cálculos se estime que la reducción del riesgo sea del 100%, ya que en la práctica se ha verificado que aún pueden existir riesgos no contemplados, además de las propias incertidumbres del sistema.

En el riesgo residual se incluyen los eventos extremos que, aunque muy poco probables, tienen cierta posibilidad de ocurrencia, así como las incertidumbres derivadas de la información e hipótesis utilizadas. Se considerarán los tamaños de bloques no previsibles tanto por su volumen como por sus posibles trayectorias así

como los producidos como consecuencia de riesgos extraordinarios, como terremotos de magnitudes superiores a las establecidas por normas sismorresistentes, grandes lluvias y temporales, huracanes, erupciones volcánicas, etc. Todos estos eventos caen en la consideración de riesgos muy poco frecuentes cuya probabilidad anual es inferior a 1/500. Para el cálculo del riesgo residual se utilizan procedimientos probabilísticos.

6.5. Criterios de aceptabilidad del riesgo.

El riesgo resultante después de adoptar las medidas de control junto con el riesgo residual, representa el riesgo total. Para determinar el grado de aceptabilidad es necesario disponer de criterios que regulen los límites entre lo aceptable y lo no aceptable.

Los criterios de aceptabilidad se basan en estudios sobre la relación de pérdidas económicas y de vidas en función del número de accidentes o fallos que han producido tales pérdidas, y que han sido recopilados por numerosos autores. Dichos estudios han permitido establecer acuerdos o consensos sobre lo que es aceptable o inaceptable. Así se ha definido la denominada zona Tolerable o ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*), que indica el intervalo de probabilidad para el cual un riesgo determinado sería tolerable, después de adoptar medidas de control, mitigación y prevención. Si aun así el riesgo resultara inaceptable, deberá revisarse la solución propuesta hasta alcanzar una mayor reducción del riesgo, incluso incorporando medidas preventivas complementarias como restricciones de uso o de información social, hasta alcanzar el nivel de tolerable.

Los criterios para decidir la aceptabilidad del riesgo varían en función de varios parámetros, como son el uso que tenga la infraestructura o instalación que puede ser afectada, los posibles daños económicos o víctimas y el tipo de riesgo (voluntario, involuntario, individual y social).

El denominado riesgo social (*societal risk*), se refiere a un peligro que puede afectar al mismo tiempo y con el mismo origen, en una o en varias zonas, a un número significativo de personas. En este caso el nivel de aceptabilidad del riesgo es menor que con respecto al riesgo individual, es decir, se requiere alcanzar una probabilidad mucho más baja para que el riesgo sea tolerable.

En la Figura 6.3 se representa la relación **F-N**, muy utilizada en los análisis de riesgos, donde se considera la frecuencia o la probabilidad de sucesos (F), y el número de víctimas potenciales (N). Dicha figura corresponde a la aplicación de un diagrama F-N a un caso de riesgo por caída de rocas en una playa de Tenerife.

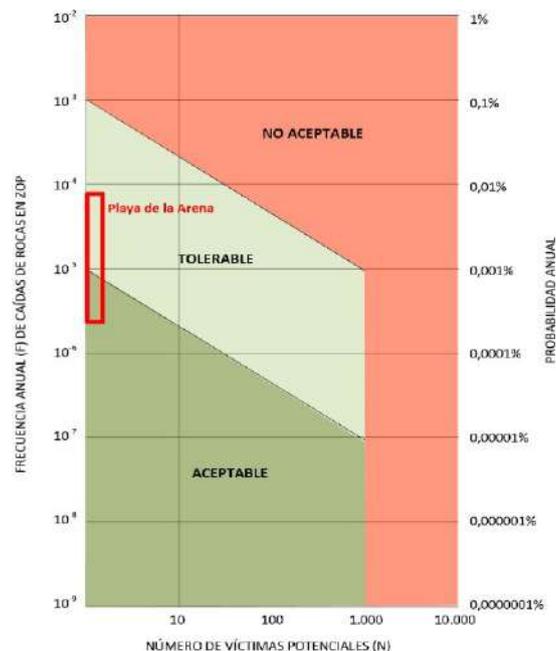


Figura 6.3.Relación F-N aplicada a un caso de desprendimientos en una playa.

De acuerdo con la figura 6.3, se establecen tres niveles de aceptabilidad aplicables cuando las consecuencias del riesgo puedan producir víctimas:

RIESGO ACEPTABLE: Correspondiente a una probabilidad inferior a 10^{-5} , equivalente a un riesgo aceptable por la sociedad sin restricciones.

RIESGO TOLERABLE: Correspondiente a una probabilidad entre 10^{-3} y 10^{-5} , definido por el criterio “**ALARP**”(acrónimo de “*as low as reasonably practicable*”) ,que implica la necesidad de adoptar medidas de protección y prevención capaces de disminuir el riesgo hasta valores razonables de acuerdo con su coste-beneficio.

RIESGO INACEPTABLE: Correspondiente a una probabilidad superior a 10^{-3} , inaceptable en cualquier circunstancia.

6.6. Justificación de la solución recomendada.

La solución adoptada, deberá justificarse de acuerdo con el procedimiento indicado estimando el factor de seguridad adoptado y su conformidad con los criterios de aceptabilidad.

Tanto en los casos en los que no sea posible reducir el riesgo a valores aceptables o tolerables como en los casos en los que se quiera dotar de mayor seguridad, se pueden adoptar medidas preventivas alternativas como restricciones de uso ya sea total o parcial, así como realizar acciones de información social para concienciar a los usuarios de los riesgos a los que están expuestos y las medidas de seguridad que deben seguir.

Las medidas preventivas pueden ir desde cerrar una carretera cuando se declaren alertas meteorológicas, a restringir el paso permanentemente a zonas recreativas, o cerrar dichas zonas en horario nocturno para reducir el riesgo.

CAPÍTULO 7: Relación entre el cambio climático y la incidencia de los movimientos de ladera.

7.1. Introducción.

El cambio climático es la variación del estado del clima, identificable en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos (IPCC, 2014). Puede deberse a procesos internos naturales o externos como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios generados por la actividad humana que inciden en la composición de la atmósfera o del uso del suelo. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) es el principal órgano internacional para la evaluación del cambio climático. Fue creado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM). En sus conclusiones se afirma categóricamente que el calentamiento en el sistema climático es inequívoco y, desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado. Por tanto, el cambio climático es una evidencia y hay que considerarlo en los estudios de riesgos de fenómenos naturales.

Los estudios del IPCC concluyen que las emisiones continuas de gases de efecto invernadero causarán un mayor calentamiento y nuevos cambios en todos los componentes del sistema climático. Se acentuará el contraste en las precipitaciones entre las regiones húmedas y secas y entre las estaciones húmedas y secas, si bien podrá haber excepciones regionales.

El cambio climático plantea riesgos para los sistemas humanos y naturales y los procesos de inestabilidad de laderas y taludes forman parte de los mismos. La evolución del clima puede acarrear cambios en los índices de precipitaciones y por tanto afectar a la incidencia de los sucesos de inestabilidad, tanto desprendimientos como deslizamientos, ya que es evidente que existe una relación inequívoca entre la ocurrencia de ambos fenómenos.

Por su parte, la Agencia Europea de Medio Ambiente, EEA (European Environment Agency) en su Informe Técnico número 13/2010, “Cartografía de los impactos de peligros naturales y accidentes tecnológicos en Europa” realizado durante el periodo 1998-2009, recoge que varias bases de datos en Europa tienen registros de casi 70 grandes derrumbes que se cobraron un total de 312 vidas y que dañaron o destruyeron una gran cantidad de infraestructuras públicas y edificios residenciales.

Para la EEA parece que no hay un patrón obvio entre el impacto producido por movimientos de ladera y los efectos del cambio climático, en cuanto a la frecuencia de los primeros. Sin embargo, es evidente que el potencial de daño causado por movimientos de suelos y rocas se agrava con el paso del tiempo.

7.2. Incidencia del cambio climático.

Como se ha visto en el presente documento, la lluvia se considera como uno de los principales factores desencadenantes de los movimientos de ladera y taludes. Estudios estadísticos que relacionan la intensidad de las precipitaciones con la ocurrencia de deslizamientos y desprendimientos, realizados en las islas Azores por Marques et al (2008), establecen como umbral de precipitaciones los 65 mm, mientras que en Madeira el umbral de precipitación a partir del cual la probabilidad de que se produzcan inestabilidades supera el 50% es de 50 mm y en las islas Canarias, esta probabilidad se alcanza a partir de 25 mm en terreno muy accidentado y 40 mm para terreno accidentado.

El viento, aunque en menor medida, también es un factor importante en el desencadenamiento de procesos de inestabilidad. En este caso, los valores críticos de velocidad del viento, a partir de los cuales se ha observado la ocurrencia de inestabilidades, son los 60 km/h en zonas costeras y los 70 km/h en zonas del interior de las islas.

Ambos factores, lluvia y viento, superan los umbrales o valores críticos reseñados cuando tienen lugar fenómenos meteorológicos adversos, que son advertidos a la población por la AEMET mediante los avisos de nivel amarillo, naranja o rojo (Fig. 7.1).

CODIGO	NOMBRE DE LA ZONA	PROVINCIA	temp. máximas			temp. mínimas			racha máxima			precipitación 12 h			precipitación 1 h			nieve 24 h		
			amilo	nanja	rojo	amilo	nanja	rojo	amilo	nanja	rojo	amilo	nanja	rojo	amilo	nanja	rojo	amilo	nanja	rojo
659001	Norte de Gran Canaria	Las Palmas	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	40	80	120	15	30	60	2	5	20
659003	Cumbres de Gran Canaria	Las Palmas	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	40	80	120	15	30	60	2	5	20
659004	Este, sur y oeste de Gran Canaria	Las Palmas	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	40	80	120	15	30	60	2	5	20
659101	Lanzarote	Las Palmas	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	40	80	120	15	30	60	2	5	20
659201	Fuerteventura	Las Palmas	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	40	80	120	15	30	60	2	5	20
659302	Cumbres de la Palma	Sta Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
659303	Este de la Palma	Sta Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
659304	Oeste de la Palma	Sta Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
659401	La Gomera	Sta Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
659501	El Hierro	Sta Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
659601	Norte de Tenerife	Sta Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
659602	Área Metropolitana de Tenerife	Sta Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
659603	Este, sur y oeste de Tenerife	Sta Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20

Figura 7.1. Umbrales y niveles de aviso para la Comunidad Autónoma de Canarias de las variables: Temperaturas, viento, precipitación y nieve (Fuente AEMET, 2018).

De acuerdo con los modelos climáticos que elabora la AEMET, la tendencia es que el porcentaje de precipitaciones vaya disminuyendo en las Islas Canarias en las próximas décadas (Fig. 7.2) y el pronóstico es que sigan disminuyendo en el próximo siglo.

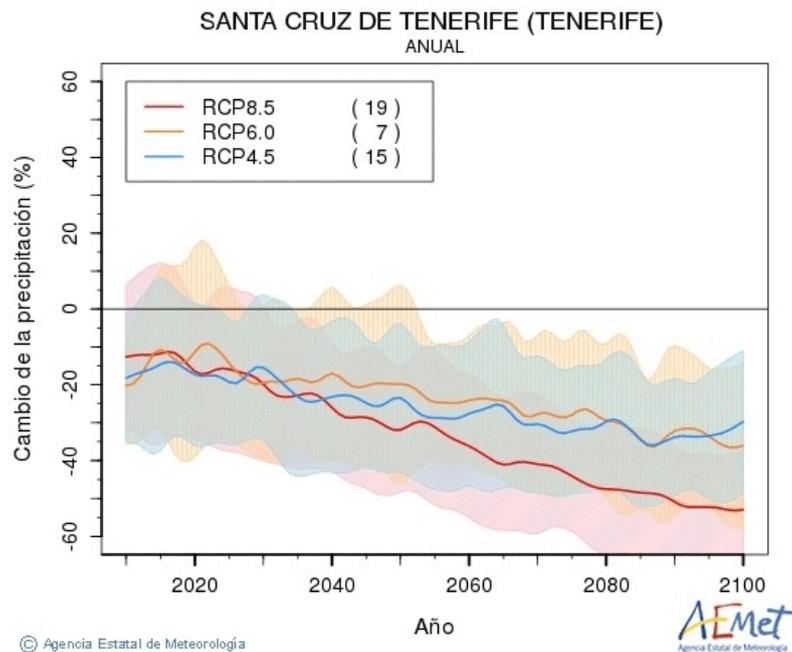


Figura 7.2. Ejemplo de modelo climático de precipitaciones para Santa Cruz de Tenerife elaborado por la AEMET.

El efecto en el terreno de esta disminución de las precipitaciones anuales, es que los materiales estarán más secos y por lo tanto serán más sensibles a la llegada de precipitaciones intensas.

Según Margottini et al (2007), con los efectos del cambio climático se pueden asumir las siguientes tendencias en los movimientos de ladera:

- Aumento en el número de flujos de escombros provenientes de lluvias de alta intensidad, junto con fenómenos de erosión y degradación del suelo, como consecuencia del aumento de las temperaturas y la aridez;
- Disminución de la actividad de fenómenos de deslizamientos de tierra lentos debido a la caída en el promedio anual total de lluvia y la consiguiente disminución en la capacidad de recarga de los niveles freáticos;
- Incremento en las deformaciones de los taludes y laderas (caídas de rocas debido a la congelación y descongelación, flujos de escombros, flujos de tierra) en áreas que ahora están cubiertas por permafrost y, por lo tanto, sustancialmente estables, luego de un aumento progresivo de la temperatura y la consiguiente reducción de permafrost y áreas glaciales.

El cambio climático provocará menos lluvias en el computo anual de precipitaciones, pero mayor número de fenómenos meteorológicos adversos en los que se superen los umbrales límites de precipitaciones que desencadenan movimientos de laderas, por lo que habrá un aumento de los mismos. Aunque ambos factores influyen, para el desencadenamiento de los mecanismos de rotura de suelos y rocas que movilizan el material en una ladera o talud de forma súbita, es más importante la superación de los umbrales límite (precipitación intensa puntual), que la cantidad de días que llueve al año (precipitación anual acumulada).

Por otro lado, el IPCC también pronostica una elevación del nivel del mar a lo largo del siglo XXI y siguientes, por lo que los sistemas costeros y las zonas bajas experimentarán cada vez más impactos adversos como inmersión, inundación costera y erosión costera (Fig.7.3), lo que provocará un incremento de desprendimientos en estas zonas.

Islas pequeñas										
Riesgo clave	Cuestiones de adaptación y perspectivas	Motores climáticos	Marco temporal	Riesgo y potencial de adaptación						
Pérdida de medios de subsistencia, asentamientos costeros, infraestructura, servicios ecosistémicos y estabilidad económica (<i>nivel de confianza alto</i>) [29.6, 29.8, figura 29-4]	<ul style="list-style-type: none"> • Existe un importante potencial para la adaptación en las islas, pero nuevos recursos externos y tecnologías mejorarían la respuesta • Mantenimiento y mejora de las funciones y los servicios ecosistémicos y de la seguridad de agua y alimentos • Se prevé que en el futuro merme mucho la eficacia de las estrategias tradicionales de respuesta de la comunidad 		Presente	<table border="1"> <tr> <td>Muy bajo</td> <td>Medio</td> <td>Muy alto</td> </tr> <tr> <td colspan="3">[Bar chart showing risk level: Low to Medium]</td> </tr> </table>	Muy bajo	Medio	Muy alto	[Bar chart showing risk level: Low to Medium]		
			Muy bajo	Medio	Muy alto					
			[Bar chart showing risk level: Low to Medium]							
Corto plazo (2030-2040)	<table border="1"> <tr> <td colspan="3">[Bar chart showing risk level: Medium to High]</td> </tr> </table>	[Bar chart showing risk level: Medium to High]								
[Bar chart showing risk level: Medium to High]										
Largo plazo 2°C (2080-2100) 4°C	<table border="1"> <tr> <td colspan="3">[Bar chart showing risk level: High to Very High]</td> </tr> </table>	[Bar chart showing risk level: High to Very High]								
[Bar chart showing risk level: High to Very High]										
La interacción del creciente nivel global del mar en el siglo XXI con episodios de gran elevación del nivel del agua supondrá una amenaza para las zonas costeras bajas (<i>nivel de confianza alto</i>) [29.4, cuadro 29-1; GTI IES 13.5, cuadro 13.5]	<ul style="list-style-type: none"> • La alta proporción de superficie costera en relación con la masa terrestre en las islas hará que la adaptación suponga un importante problema financiero y de recursos • Entre las posibilidades de adaptación figuran el mantenimiento y la restauración de la topografía y los ecosistemas costeros, una mejor gestión de los suelos y los recursos de agua dulce y unos códigos de construcción y pautas de asentamiento adecuados 		Presente	<table border="1"> <tr> <td>Muy bajo</td> <td>Medio</td> <td>Muy alto</td> </tr> <tr> <td colspan="3">[Bar chart showing risk level: Low to Medium]</td> </tr> </table>	Muy bajo	Medio	Muy alto	[Bar chart showing risk level: Low to Medium]		
			Muy bajo	Medio	Muy alto					
			[Bar chart showing risk level: Low to Medium]							
Corto plazo (2030-2040)	<table border="1"> <tr> <td colspan="3">[Bar chart showing risk level: Medium to High]</td> </tr> </table>	[Bar chart showing risk level: Medium to High]								
[Bar chart showing risk level: Medium to High]										
Largo plazo 2°C (2080-2100) 4°C	<table border="1"> <tr> <td colspan="3">[Bar chart showing risk level: High to Very High]</td> </tr> </table>	[Bar chart showing risk level: High to Very High]								
[Bar chart showing risk level: High to Very High]										

Figura. 7.3. Riesgos clave en islas pequeñas del cambio climático y potencial de reducción de los riesgos mediante la adaptación y mitigación (Fuente: IPCC, 2014).

Por lo tanto, puede concluirse que el cambio climático es una evidencia indiscutible y que existe una relación causa-efecto entre el nivel de precipitaciones y el desencadenamiento de movimientos de laderas. Que existen unos umbrales de precipitaciones a partir de los cuales se activan los mecanismos de los movimientos masas de suelo y rocas que provocan desprendimientos y deslizamientos y que estos umbrales se superan generalmente con los fenómenos meteorológicos adversos. Que el cambio climático provoca en la actualidad y provocará en las próximas décadas mayor número de fenómenos atmosféricos que llevan asociadas precipitaciones intensas que superaran los umbrales que disparan los movimientos de ladera, por lo que estima un mayor número de este tipo de fenómenos, aunque en la actualidad no es posible establecer ni la frecuencia ni la intensidad de los mismos.

7.3. Mitigación de los efectos del cambio climático

Los riesgos se amplifican para los usuarios de infraestructuras deficitarias o para las personas que viven en zonas expuestas en edificios de mala calidad y sin protección frente a movimientos de ladera y taludes. Mediante la reducción de los déficits de servicios básicos, la mejora de la vivienda y la construcción de sistemas de infraestructuras resilientes se podrían conseguir reducciones significativas de la vulnerabilidad y la exposición en las zonas urbanas y en las redes de comunicación y transporte.

Disponer de guías metodológicas para la gestión y tratamiento de los procesos de inestabilidad de laderas y taludes podría ayudar a mejorar aún más las normas de seguridad contra movimientos de ladera a nivel europeo al proporcionar información básica esencial para la gestión integrada de riesgos.

Para la EEA, en las últimas décadas ha habido un cambio en el enfoque de la gestión integrada de riesgos, la mitigación defensiva, que ha reducido el impacto de los movimientos de ladera con éxito.

Como los movimientos de ladera son fenómenos locales, es particularmente importante la participación e implicación de todas las partes interesadas (técnicos, responsables públicos y población) de la región de que se trate, para lograr el mejor y mayor conocimiento del fenómeno y de sus riesgos y abordar la gestión del problema con mayores garantías y efectividad.

Una vez que se tiene el mejor conocimiento del fenómeno y que se dispone de las herramientas metodológicas apropiadas para su estudio, el foco debe ponerse en las medidas preventivas, como el principal pilar para la mitigación de los efectos del cambio climático.

La futura implantación y posterior aplicación de las guías de gestión de los procesos de inestabilidad de laderas y taludes en las respectivas regiones volcánicas insulares de la Macaronesia, que se deriven del proyecto MACASTAB, procurarán una mejor adaptación al incremento de los fenómenos meteorológicos adversos y a la variación del nivel de mar. Tomar las medidas que se indiquen en la metodología generada en MACASTAB, a nivel de proyecto de obras y a nivel de planificación territorial, hará que aumente la resiliencia y se posibilite el desarrollo sostenible, favoreciendo la adaptación con éxito al cambio climático de los archipiélagos volcánicos de la Macaronesia.



Anejo I. Clasificación de Unidades Geotécnicas de la Macaronesia.

Unidad Geotécnica	Subunidad
Unidad I: Complejos basales	
Unidad II: Coladas y macizos sálicos masivos	
Unidad III: Coladas basálticas alteradas	
Unidad IV: Coladas basálticas sanas	IVa: Muy escoriáceas y/o pahoe-hoe
	IVb: Masivas o poco escoriáceas
Unidad V: Materiales Piroclásticos	Va: Ignimbritas soldadas
	Vb: Tobas surtseyanas
	Vc: Aglomerados de naturaleza pumítica
	Vd: Aglomerados de naturaleza basáltica
	Ve: Aglomerados brechoides
	Vf: Depósitos piroclásticos pumíticos sueltos
	Vg: Depósitos piroclásticos basálticos sueltos
	Vh: Ignimbritas no soldadas
Unidad VI: Depósitos aluvio-coluviare	
Unidad VII: Arenas litorales	
Unidad VIII: Suelos arcillosos y limosos	
Unidad IX: Suelos superficiales y vegetales	
Unidad X: Caliches	
Unidad XI: Rellenos antrópicos	

Unidad Geotécnica

Tipo de movimiento de ladera

Unidad I: Complejos basales

Considerados como las raíces de los primitivos edificios volcánicos, afloran en extensiones significativas en algunas las islas de los archipiélagos de la Macaronesia.

Los Complejos Basales están representados por sedimentos submarinos, lavas submarinas y rocas plutónicas. Este conjunto está atravesado por multitud de diques con una densidad de intrusión tan elevada que frecuentemente no dejan rastro de la roca encajante. Es habitual que presenten un alto grado de alteración por lo que los materiales rocosos son deleznable y de difícil reconocimiento. Todo ello les confiere características de roca blanda y fracturada, presentando generalmente valores del RMR_b menores a 40.

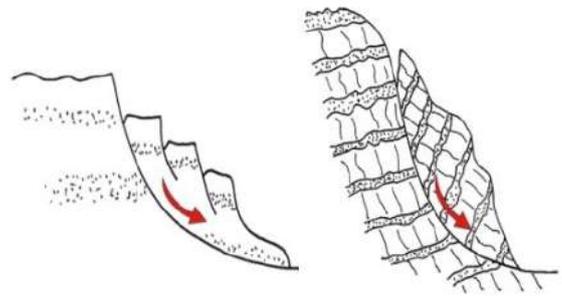
Los problemas geotécnicos propios de esta unidad son los siguientes:

- Alta heterogeneidad, tanto en vertical como en horizontal.
- Materiales muy alterados, de baja resistencia y alta deformabilidad.
- Áreas de relieve abrupto y tectonizado. Inestabilidades puntuales o desprendimientos.
- Existencia de recubrimientos superficiales (naturales o antrópicos).

- Caída de bloques y chineo.



- Deslizamientos rotacionales



Unidad Geotécnica

Tipo de movimiento de ladera

Unidad II: Coladas y macizos sálicos masivos

Esta unidad constituida por materiales rocosos altamente resistentes, aparece en dos formas de afloramiento:

1) Como coladas de gran espesor, habitualmente con disposición horizontal o como paquetes tabulares gruesos con pendientes no muy pronunciadas y gran extensión horizontal. En ocasiones, estos paquetes pueden estar formados por brechas muy compactas de fragmentos de naturaleza igualmente sálica.

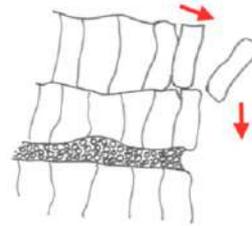
2) Como domos, a modo de macizos rocosos de grandes dimensiones verticales enraizados en el subsuelo y de extensión horizontal más limitada.

En cualquier caso, las características geotécnicas de ambos tipos de afloramiento se consideran, a efectos prácticos, similares por lo que procede considerarlos como una misma unidad geotécnica. Ambos son coladas o macizos de composición traquítica o fonolítica, en general de moderada a alta capacidad portante con características de roca dura y valores de RMR_b comprendidos entre 75 a 90.

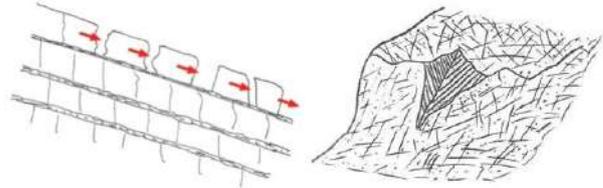
Los problemas geotécnicos más habituales son los siguientes:

- Alteración superficial que puede ser localmente importante.
- Posibles asientos diferenciales debidos a heterogeneidad litológica.

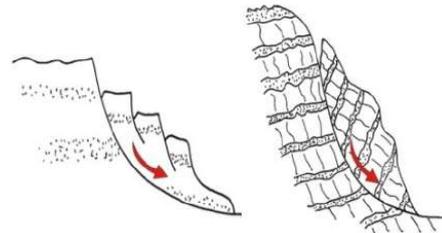
- Vuelcos.



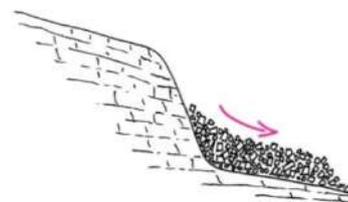
- Deslizamientos traslacionales (sup. plana y cuña)



- Deslizamientos rotacionales



- Avalanchas rocosas.



Unidad Geotécnica

Tipo de movimiento de ladera

Unidad III: Coladas basálticas alteradas

Corresponden a las fases de formación de grandes escudos volcánicos en los comienzos del volcanismo subaéreo de las islas. En general, presentan alteración parcial o total en todo el macizo con diferentes tonalidades (de rojizos a azulados). A veces se reconoce la disyunción esferoidal. Los macizos muy alterados se comportan como un suelo de elevada expansividad y deformabilidad. Además, pueden aparecer también intercalados mantos piroclásticos y frecuentes zonas rubefactadas, denominadas “almagres”, que en ocasiones corresponden a niveles de paleosuelos que han sido calcinados por el calor de la colada suprayacente. Las versiones tanto “aa” como “pahoe-hoe” no presentan comportamientos geotécnicos sustancialmente diferentes, debido a que el grado de alteración es tal que los huecos han sido ocupados por productos de alteración. La presencia de niveles escoriáceos intercalados, propios de lavas “aa”, produce una gran heterogeneidad, ya que provocan alternancias tanto vertical como horizontalmente. Es frecuente además, la existencia de cavernas debido a la circulación de agua y la baja compactación.

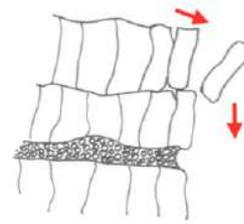
Suelen presentar en superficie valores de RMR_b comprendidos entre 40 a 60.

Otros problemas geotécnicos en esta unidad son:

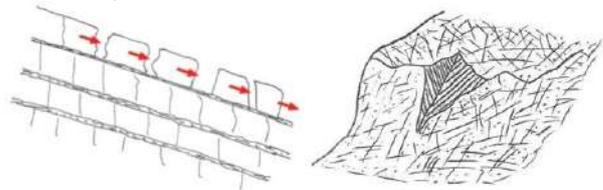
- Baja resistencia y elevada deformabilidad en situaciones de elevada alteración local.
- Inestabilidades puntuales en zonas próximas o adyacentes a relieves montañosos de pendiente moderada a alta. En general fuertes abarrancamientos.
- Asientos diferenciales por afloramiento de diferentes unidades.
- Intercalación de niveles de suelos plásticos y expansivos.
- Asientos de consolidación en medios arcillosos, especialmente en zonas con desarrollo de grandes espesores de suelo sobre coladas basálticas extremadamente alteradas.



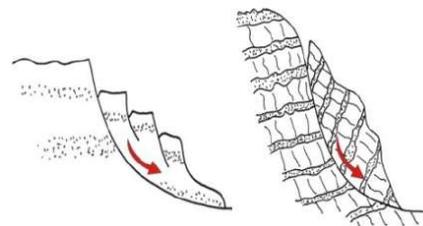
- Vuelcos.



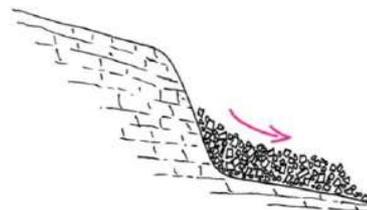
- Deslizamientos traslacionales (sup. plana y cuña)



- Deslizamientos rotacionales



- Avalanchas rocosas.



Unidad Geotécnica	Tipo de movimiento de ladera
Unidad IV: Coladas basálticas sanas	IVa: Muy escoriáceas y/o pahoe-hoe

Coladas basálticas sanas, con grado de meteorización I o II, del tipo del tipo “aa” y/o del tipo “pahoehoe”, con las siguientes características:

- Lavas “aa” muy escoriáceas: La sección vertical consiste en un nivel central de roca basáltica (macizo rocoso) de espesor inferior a 2 m, surcado por una red de diaclasas de retracción por enfriamiento y solidificación del fundido, limitado abajo y arriba por dos franjas escoriáceas irregulares (material granular).
- Lavas “pahoe-hoe”: Se caracterizan por la presencia de cavidades o tubos volcánicos y por tener una superficie lisa y ondulada, aunque en detalle aparecen con formas similares a vísceras o cuerdas entrelazadas y corrugadas. Internamente presentan gran número de vacuolas o pequeños huecos más o menos esféricos que les otorgan gran porosidad.

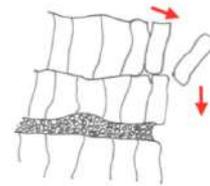
En ambas, los niveles masivos de roca basáltica, en general, presentan valores de RMR_b comprendidos entre 60 y 85.

Algunos problemas geotécnicos en esta unidad son:

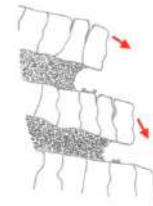
- Asientos diferenciales debidos a la presencia de materiales rocosos duros próximos a materiales granulares de alta deformabilidad.
- Posible presencia de oquedades debido a la existencia de tubos volcánicos y dificultad para su detección.
- Existencia de niveles escoriáceos con parámetros geotécnicos muy desfavorables intercalados entre los materiales masivos más resistentes.
- Los niveles escoriáceos presentan gran complejidad y dificultad para su caracterización geotécnica.
- Inestabilidades de laderas naturales o de taludes excavados, como consecuencia de la presencia de niveles escoriáceos sueltos, que pueden producir desplomes de los niveles masivos por erosión diferencial.
- Hundimientos y colapsos.



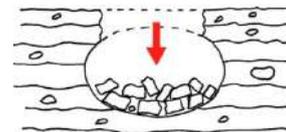
- Vuelcos.



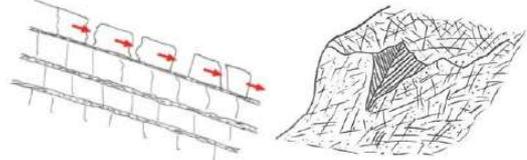
- Caídas por descalces



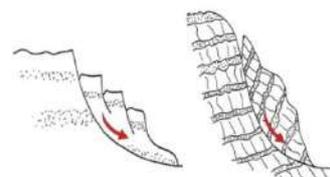
- Colapsos



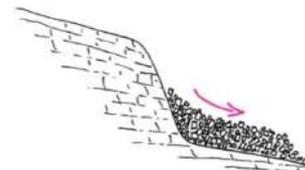
- Deslizamientos traslacionales (sup. plana y cuña)



- Deslizamientos rotacionales



- Avalanchas rocosas.



Unidad Geotécnica	Tipo de movimiento de ladera
Unidad IV: Coladas basálticas sanas	IVb: Masivas o poco escoriáceas

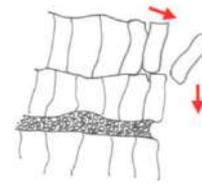
Coladas basálticas sanas, con grado de meteorización I o II, del tipo del tipo “aa” o escoriáceas. La sección vertical de estas lavas consiste en un nivel central de roca basáltica (macizo rocoso) de espesor superior a 2 m, surcado por una red de diaclasas de retracción por enfriamiento y solidificación del fundido, limitado abajo y arriba por dos franjas escoriáceas irregulares (material granular) de espesores inferiores a 0,50 m y ausencia de cavidades. Esta subunidad presenta un aspecto de colada masiva debido al gran espesor de los niveles de roca masiva y el poco espesor de los niveles escoriáceos.

Los niveles masivos de roca basáltica, en general, presentan valores de RMR_b comprendidos entre 60 y 85.

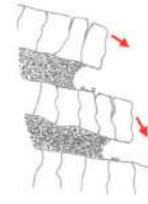
Algunos problemas geotécnicos en esta unidad son:

- Asientos diferenciales debidos a la presencia de materiales rocosos duros próximos a materiales granulares de alta deformabilidad.
- Existencia de niveles escoriáceos con parámetros geotécnicos muy desfavorables intercalados entre los materiales masivos más resistentes.
- Los niveles escoriáceos presentan gran complejidad y dificultad para su caracterización geotécnica.
- Inestabilidades de laderas naturales o de taludes excavados, como consecuencia de la presencia de niveles escoriáceos sueltos, que pueden producir desplomes de los niveles masivos por erosión diferencial.

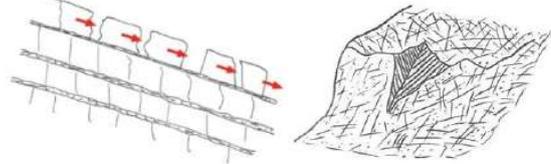
- Vuelcos.



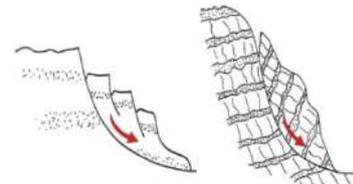
- Caídas por descalces



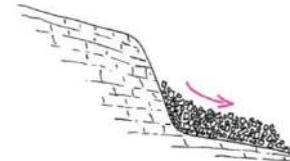
- Deslizamientos traslacionales (sup. plana y cuña)



- Deslizamientos rotacionales



- Avalanchas rocosas.



Unidad Geotécnica

Tipo de movimiento de ladera

Unidad V: Materiales Piroclásticos

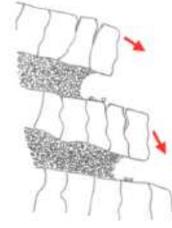
Va: Ignimbrita soldada

Esta variedad de materiales se origina cuando una masa de productos piroclásticos es transportada en forma de dispersión de gas y de alta o moderada densidad de partículas; son corrientes de piroclastos fluidificadas (alta concentración de partículas) que se desplazan a ras de suelo a gran velocidad (50 – 300 m/s) propulsadas por el gas que sustenta las partículas, con un flujo esencialmente laminar. El resultado es un material con características de roca más o menos dura, con un grado de compacidad y/o cementación variable. Al ser depósitos de altas temperaturas, pueden llegar a presentar “flamas”, fragmentos de pómez aplastados y alargados en la dirección de flujo.

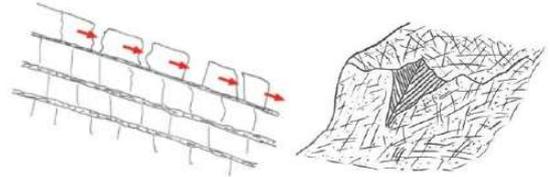
Las ignimbritas soldadas se asemejan más a un flujo lávico que a un depósito piroclástico. Se trata de rocas duras o semiduras con un grado de compacidad y/o cementación variable. Se corresponden con depósitos piroclásticos pumíticos o cineríticos muy compactos, tales como ignimbritas con textura eutaxítica.

Presentan en superficie valores de RMR_b comprendidos entre 60 a 75.

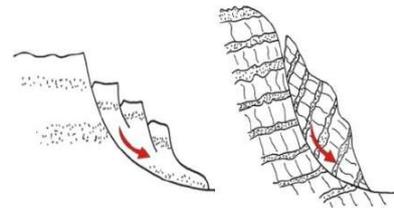
- Caídas por descalces



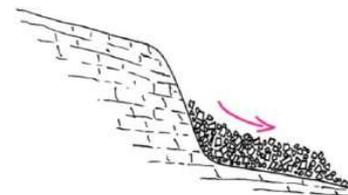
- Deslizamientos traslacionales (sup. plana y cuña)



- Deslizamientos rotacionales



- Avalanchas rocosas.



Unidad Geotécnica

Tipo de movimiento de ladera

Unidad V: Materiales Piroclásticos

Vb: Tobas surtseyanas

Son depósitos piroclásticos de caída y de flujo que resultan de la actividad hidromagmática equivalente a la del tipo estromboliano, que ocurre en contacto con grandes masas de agua (mar o lagunas). Se trata de rocas con grado de compactación y cimentación variable. Presentan una ventana granulométrica variada, desde finos, a arenas y gravas. Las partículas están soldadas entre sí y presentan normalmente color amarillento debido a la alteración del vidrio volcánico.

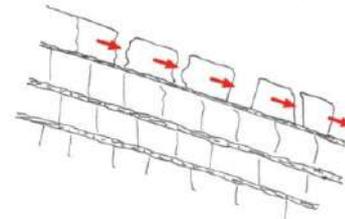
Los problemas geotécnicos más habituales de estos materiales son los siguientes:

- Baja resistencia y elevada deformabilidad.
- Colapsabilidad mecánica.
- Asientos diferenciales.
- Moderada expansividad. Este es un factor a considerar con mayor detenimiento en los niveles piroclásticos sueltos o débilmente cementados, especialmente si los procesos de alteración producen localmente niveles arcillosos.

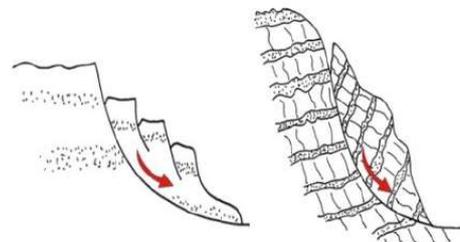
- Caídas de bloques y chineo



- Deslizamientos traslacionales (superficie plana)



- Deslizamientos rotacionales



Unidad Geotécnica

Tipo de movimiento de ladera

Unidad V: Materiales Piroclásticos

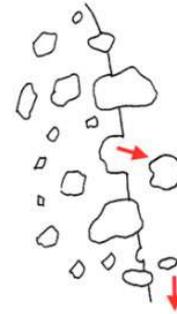
Vc: Aglomerados de naturaleza pumítica

Están constituidos esencialmente por arenas y gravas de naturaleza pumítica, con líticos de tamaño grava. Los constituyentes están soldados entre sí. Se forman en el curso de erupciones de carácter explosivo. Presentan una coloración clara.

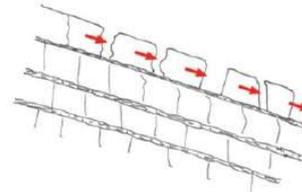
Los problemas geotécnicos más habituales de estos materiales son los siguientes:

- Resistencia variable, desde media a alta resistencia y baja deformabilidad, a baja resistencia y elevada deformabilidad, atendiendo al grado de soldadura de las partículas.
- Colapsabilidad mecánica cuando el contenido de pómez es apreciable.

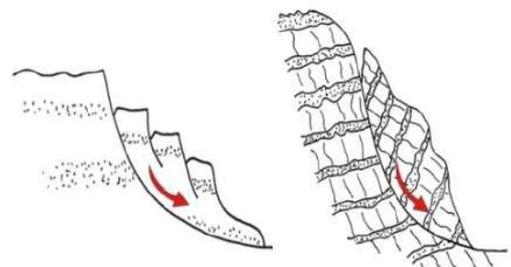
- Caídas de bloques y chineo



- Deslizamientos traslacionales (superficie plana)



- Deslizamientos rotacionales



Unidad Geotécnica

Tipo de movimiento de ladera

Unidad V: Materiales Piroclásticos

Vd: Aglomerados de naturaleza basáltica

Están constituidos por arenas, gravas y bloques de naturaleza basáltica cuyos constituyentes están soldados entre sí y se encuentran cerca de la fuente eruptiva. Se forman en el transcurso de erupciones de carácter efusivo. Presentan una coloración rojiza. Su densidad seca varía entre 11 y 20 KNm³ y su resistencia a la compresión uniaxial entre 2 y 37 MPa.

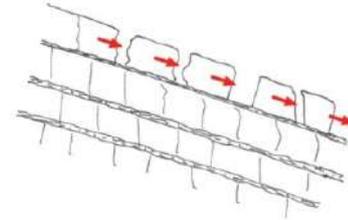
Los problemas geotécnicos más habituales de estos materiales son los siguientes:

- Resistencia variable, desde media a alta resistencia y baja deformabilidad, a baja resistencia y elevada deformabilidad.
- Moderada expansividad. Este es un factor a considerar con mayor detenimiento en los niveles piroclásticos sueltos o débilmente cementados, especialmente si los procesos de alteración producen localmente niveles arcillosos.

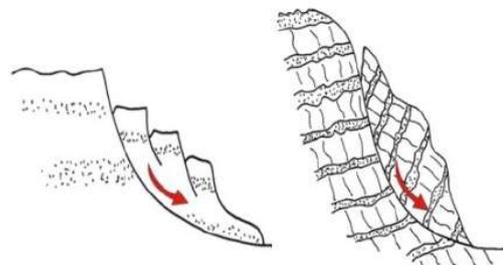
- Caídas de bloques y chineo



- Deslizamientos traslacionales (superficie plana)



- Deslizamientos rotacionales



Unidad Geotécnica

Tipo de movimiento de ladera

Unidad V: Materiales Piroclásticos

Ve: Aglomerados brechoides

Esta unidad está asociada a episodios eruptivos violentos de alta explosividad, en ocasiones relacionados con procesos de colapso de caldera o bien con fenómenos de deslizamientos gravitacionales en masa. Su resultado final es una masa caótica y brechoide formada por bloques de naturaleza diversa, en general muy angulosos, con gran variación de tamaño de los mismos englobados en una matriz fina más o menos cementada y ocasionalmente muy dura. Forman paquetes de grandes espesores (hasta cientos de metros) y presentan pendientes poco pronunciadas de brechas compactas y caóticas de naturaleza mono o polimíctica. Pueden presentar características de roca dura y en algunos casos semidura.

Presentan valores de RMR_b comprendidos entre 60 y 75.

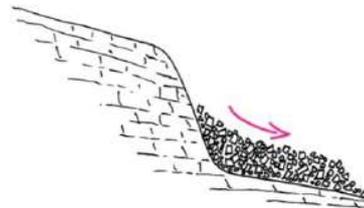
Los problemas geotécnicos potenciales a tener en consideración son los siguientes:

- Inestabilidades de laderas naturales o taludes excavados.
- Caídas de bloques que se desprenden de la matriz.
- Agresividad de aguas freáticas
- Asientos debidos a la compresibilidad de niveles orgánicos o con abundante materia orgánica.

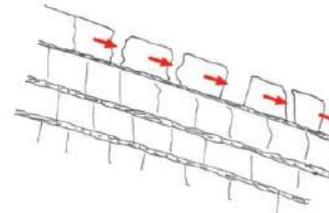
- Caídas de bloques y chineo



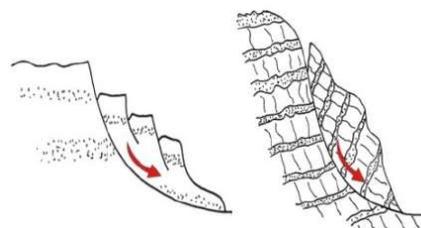
- Avalanchas rocosas.



- Deslizamientos traslacionales (superficie plana)



- Deslizamientos rotacionales



Depósitos piroclásticos no compactos, sueltos (tephra) y fácilmente colapsables, de naturaleza traquítica y/o fonolítica, ligeros, claros y porosos. Constituyen los depósitos de pómez y cenizas, también conocidos como depósitos plinianos o de lluvia piroclástica, que son los que caen desde la zona de dispersión horizontal de la columna eruptiva; cuanto mayor es la altura de la columna eruptiva, mayor es la superficie cubierta. Forman depósitos en mantos que cubren uniformemente la topografía. En cuanto a la granulometría, están bien clasificados, con clasificación normal o inversa, e incluso a veces, con bandeo paralelo.

Se trata de materiales granulares de baja densidad, con pesos específicos aparentes secos medios habituales entre 5 y 13 kN/m³. Angulos de rozamiento interno entre 26 a 45°. Cohesión efectiva de 0 a 25 KPa.

Los problemas geotécnicos más habituales de estos materiales son los siguientes:

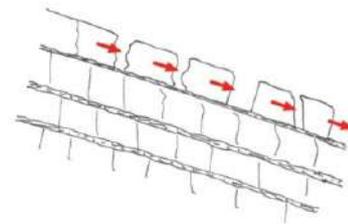
- Baja resistencia y elevada deformabilidad.
- Colapsabilidad mecánica.
- Asientos diferenciales.
- Moderada expansividad. Este es un factor a considerar con mayor detenimiento en los niveles piroclásticos sueltos o débilmente cementados, especialmente si los procesos de alteración producen localmente niveles arcillosos.



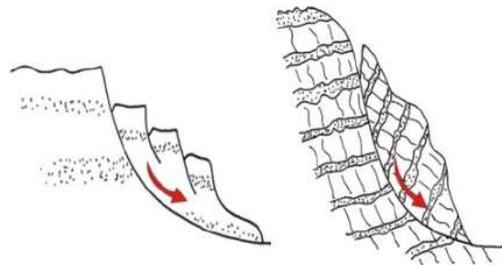
- Caídas de bloques y chineo



- Deslizamientos traslacionales (superficie plana)



- Deslizamientos rotacionales



Se forman por caída de fragmentos de magma de composición basáltica que se depositan en torno al centro eruptivo, en erupciones estrombolianas generalmente. Presentan un bandeo paralelo, están bien clasificados, con gradación normal o inversa y cubren uniformemente la topografía formando mantos. Los de pequeño tamaño se denominan lapillis (entre 2 y 64 mm); los de mayor tamaño (superior a 64 mm) reciben el nombre genérico de escorias y bloques, que pueden adquirir formas redondeadas al girar en el aire (bombas). La fracción fina (menor de 2 mm) se denomina cenizas.

Se trata de materiales granulares de baja densidad, con pesos específicos aparentes secos medios habituales entre 12 y 17 kN/m³. Angulos de fricción interna entre 29 a 50°. Cohesión efectiva de 0 a 100 KPa.

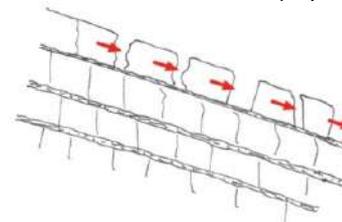
Los problemas geotécnicos más habituales de estos materiales son los siguientes:

- Baja resistencia y elevada deformabilidad.
- Colapsabilidad mecánica.
- Asientos diferenciales.
- Moderada expansividad. Este es un factor a considerar con mayor detenimiento en los niveles piroclásticos sueltos, especialmente si los procesos de alteración producen localmente niveles arcillosos.

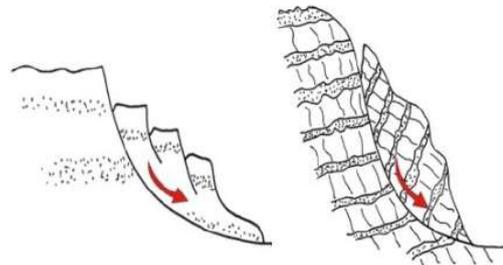
- Caídas de bloques y chineo



- Deslizamientos traslacionales (superficie plana)



- Deslizamientos rotacionales



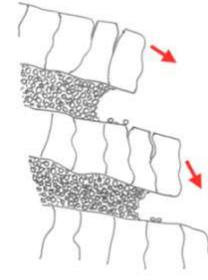
A las ignimbritas no soldadas, de tonalidades blancoamarillentas y con contenidos apreciables de pómez, se les conoce localmente con el nombre de “toba”, al igual que los piroclastos de proyección aérea cementados. También se les conoce como “tosca”. Se trata de rocas duras o semiduras. Se corresponden con depósitos piroclásticos pumíticos o cineríticos muy compactos, sin textura eutaxítica o cineritas compactas. Esta variedad de materiales se origina cuando una masa de productos piroclásticos es transportada en forma de dispersión de gas y de alta o moderada densidad de partículas; el resultado es un material con características de roca más o menos dura, con un grado de compacidad y/o cementación variable. Durante su formación han cubierto las depresiones topográficas existentes en el momento de la erupción.

Presentan en superficie valores de RMR_b comprendidos entre 60 a 75, densidad seca entre 10 y 20 KNm^3 y resistencia a compresión uniaxial entre 5 y 35 MPa.

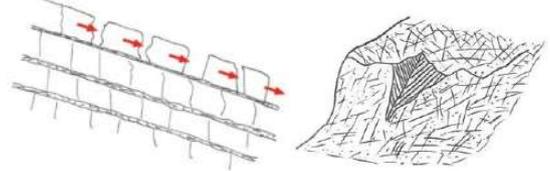
Los problemas geotécnicos más habituales de estos materiales son los siguientes:

- Resistencia variable, desde media a alta resistencia y baja deformabilidad, a baja resistencia y elevada deformabilidad, atendiendo a su contenido en pómez.
- Colapsabilidad mecánica, atendiendo a su contenido en pómez.
- Moderada expansividad, si los procesos de alteración producen localmente niveles arcillosos.

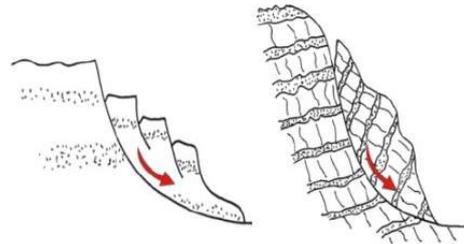
- Caídas por descalces



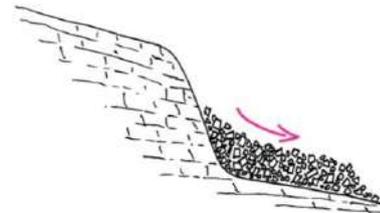
- Deslizamientos traslacionales (sup. plana y cuña)



- Deslizamientos rotacionales



- Avalanchas rocosas.



Unidad VI: Depósitos aluvio-coluviales

Los depósitos aluviales son sedimentos fluviales poco o nada consolidados. Están constituidos por gravas, arenas, limos y arcillas. Estos depósitos tienden a extenderse a lo largo del curso bajo de los ríos, formando llanuras aluviales y deltas, en terrenos con muy bajas pendientes.

Los depósitos coluviales son formaciones sedimentarias con un grado de consolidación muy variable, situadas a base de laderas montañosas, en los que las partículas son transportadas por gravedad bien como material suelto o por sedimentación a partir de aguas no canalizadas. Se caracterizan por presentar escasa o nula granoselección, con clastos angulares y matriz arcillosa. Son materiales porosos y compresibles. Habitualmente presentan movimiento muy lento con signos notables de inestabilidad debido a que en ocasiones la pendiente supera la de equilibrio.

Tanto en el caso de los depósitos aluviales como coluviales, la matriz de naturaleza detrítica (limosa o arcillosa) puede ser abundante o estar ausente. En conjunto, son terrenos blandos o sueltos.

Los problemas geotécnicos que pueden afectar a las condiciones de cimentación en esta unidad son, entre otros, los siguientes:

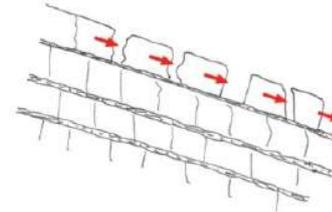
- Moderada y baja resistencia, asociada a deformabilidad moderada a alta.
- Inestabilidades puntuales en zonas próximas a relieves montañosos de pendiente moderada a alta. Ligeros abarrancamientos.
- Asientos diferenciales.
- Asientos por consolidación en términos arcillosos. Asientos de colapso.
- Moderada expansividad de los niveles arcillosos.



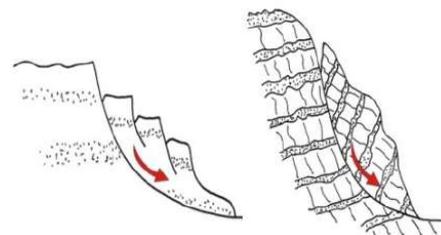
- Caídas de bloques y chineo



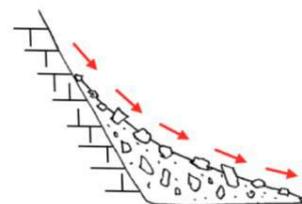
- Deslizamientos traslacionales (superficie plana)



- Deslizamientos rotacionales



- Flujos de tierra y derrubios.



Unidad VII: Arenas litorales

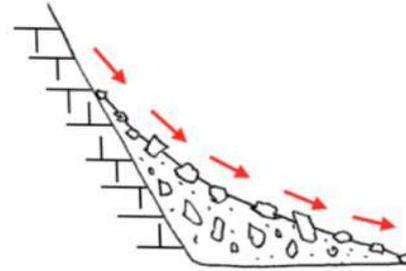
Esta unidad está constituida en su mayoría por depósitos de playa de arena suelta oscura de naturaleza basáltica o arena clara de naturaleza silíceo o calcárea, en extensiones o acumulaciones por transporte y sedimentación marina o eólica (formaciones de dunas). Aparecen a lo largo de la línea de costa o en sus proximidades, así como en las desembocaduras de los principales barrancos. También se pueden encontrar, de mucha menor entidad, depósitos de arenas intercalados entre coladas, que indican periodos de inactividad volcánica. Todos ellos tienen baja a muy baja capacidad portante. Son terrenos blandos o sueltos.

La presencia del nivel freático provoca, debido a la naturaleza detrítica y suelta de los terrenos, unas condiciones de estabilidad de zanjas o excavaciones muy deficientes (taludes inestables) y una necesidad de drenaje de las mismas.

Otros problemas geotécnicos posibles a tener en consideración son:

- Baja resistencia y alta deformabilidad.
- Agresividad de las aguas freáticas.
- Asientos debidos a la compresibilidad de niveles orgánicos o con abundante materia orgánica.
- Capacidad portante baja y colapsable por inundación.
- Problemas de inestabilidad de taludes durante las excavaciones.

- Flujos de tierra y derrubios.



Unidad Geotécnica

Tipo de movimiento de ladera

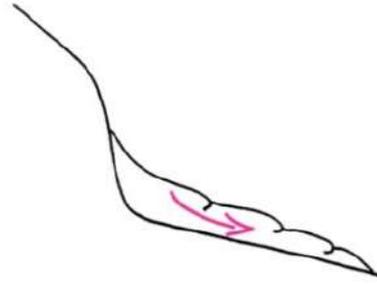
Unidad VIII: Suelos arcillosos y limosos

Unidad constituida por suelos residuales y sedimentos lacustres de naturaleza fundamentalmente arcillosa y/o limosa. Se forman bien en el fondo de cuencas lacustres cerradas o semicerradas por sedimentación de detritos finos o muy finos de tamaño arcilla, o bien asociados a la intensa alteración superficial del material rocoso hasta la formación de capas de suelos que en ocasiones pueden alcanzar espesores de varios metros. En ambos casos, el material resultante suele tener naturaleza limosa o arcillosa.

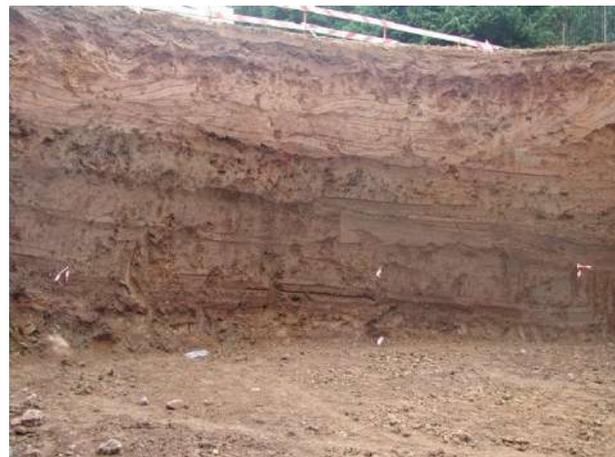
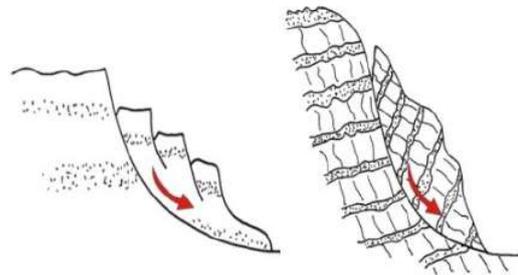
Los problemas geotécnicos más habituales de estas unidades son los siguientes:

- Baja resistencia y alta deformabilidad.
- Asientos debidos a la compresibilidad de niveles orgánicos o con abundante materia orgánica. Asientos de colapso en las facies más limosas.
- Fenómenos de hinchamiento o expansividad motivados por cambios de humedad del terreno.

- Flujos de barro



- Deslizamientos rotacionales



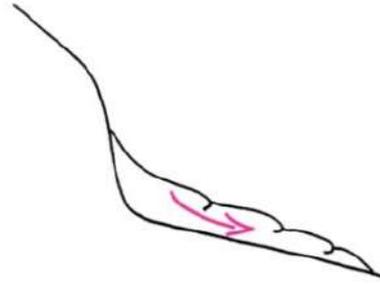
Unidad Geotécnica

Tipo de movimiento de ladera

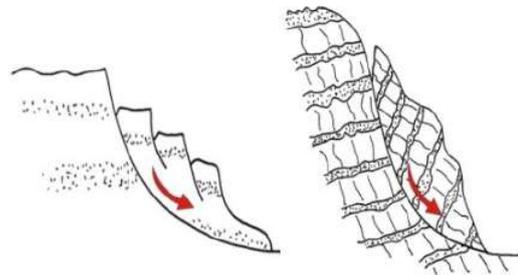
Unidad IX: Suelos superficiales y vegetales

Los suelos superficiales/vegetales corresponden a una mezcla de partículas con dimensiones variadas y de composición diversa, con un gran contenido en materia orgánica y colonización vegetal. Resulta de los procesos edafológicos de los depósitos volcánicos de naturaleza traquítica y / o basáltica. Se forman en períodos de inactividad volcánica.

- Flujos de barro



- Deslizamientos rotacionales



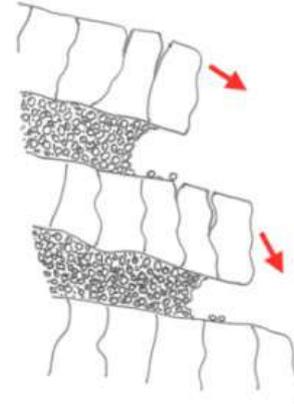
Unidad Geotécnica

Tipo de movimiento de ladera

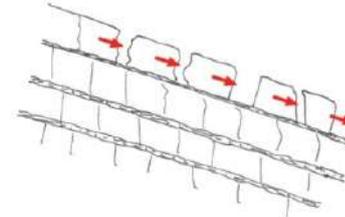
Unidad X: Caliches

El caliche es una roca sedimentaria constituida esencialmente por calcita (carbonato de calcio).. Se forman en climas áridos por evapotranspiración del agua y precipitación del carbonato cálcico presente en la misma. Forman costras compactas visibles en el suelo, de color claro (blanca, amarillenta o gris) y granulometría fina.

- Caidas por descalces



- Deslizamientos traslacionales (superficie plana)



Unidad Geotécnica

Tipo de movimiento de ladera

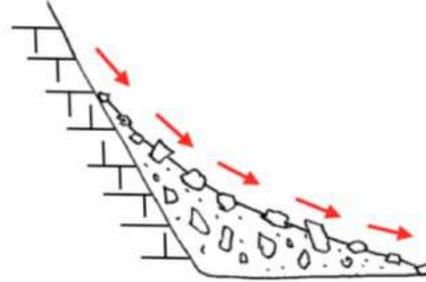
Unidad XI: Rellenos antrópicos

Bajo esta denominación se incluyen los depósitos colocados por la acción del hombre, en general sin control alguno, de origen muy variado, debidos a movimientos de tierras asociados a la construcción de vías de comunicación, de edificaciones, de canteras tanto activas como abandonadas, explanadas para infraestructuras, etc. La naturaleza de estos depósitos es muy diversa y en ocasiones depende de la finalidad para la que fueron destinados. En términos generales se pueden asimilar a sedimentos heterométricos, con bolos y bloques angulosos a subangulosos y abundantes finos en la matriz (arenas y limos). En determinadas circunstancias pueden contener materiales de reciclaje y residuos de la actividad humana. Constituyen una de las amenazas más importantes para el buen comportamiento de las cimentaciones.

Los problemas geotécnicos más habituales de estas unidades son los siguientes:

- Baja resistencia y elevada y muy elevada deformabilidad a corto y largo plazo.
- Debido a la elevada heterogeneidad que presentan, plantean un problema añadido a la hora de definir sus características geotécnicas. Su comportamiento es muy diferenciado y da lugar a asentamientos a largo plazo.
- Grados de compactación muy bajos o inexistentes.
- Riesgos de colapsos, combustión espontánea, emanación de gases, agresividad química, etc.

- Flujos de tierra y derrubios.



Anejo II. Metodología para la aplicación del Índice de Susceptibilidad de Inestabilidad de Taludes en terrenos Volcánicos (ISTV).

II.1 Introducción:

El ISTV (índice de susceptibilidad de inestabilidad de taludes en rocas volcánicas) permite evaluar el grado de inestabilidad en función de una serie de factores predominantes observados en numerosos casos con problemas de caída de rocas o desprendimientos.

Los principales objetivos específicos de este índice son los siguientes:

- Aportar un procedimiento para identificar taludes con mayor posibilidad de sufrir caídas de rocas, de fácil y rápida aplicación sin requerir medios especializados.
- Aportar criterios para la adopción de medidas preventivas.
- Seleccionar las zonas que requieran mayor atención para la realización de estudios detallados conducentes a la estabilización y control de taludes.

Con respecto a su alcance, el ISTV tiene carácter de evaluación preliminar, y debe ser complementado con estudios adicionales en los taludes que requieran la adopción de medidas de estabilización o control. El índice ISTV es aplicable a rocas volcánicas con las siguientes exclusiones:

- Materiales muy meteorizados o alterados.
- Depósitos de suelos, derrubios de ladera o coluviales.

II.2. Diagrama de flujo:

En la siguiente figura se presenta un diagrama de flujo en el que se muestran los pasos a seguir para el cálculo del ISTV:

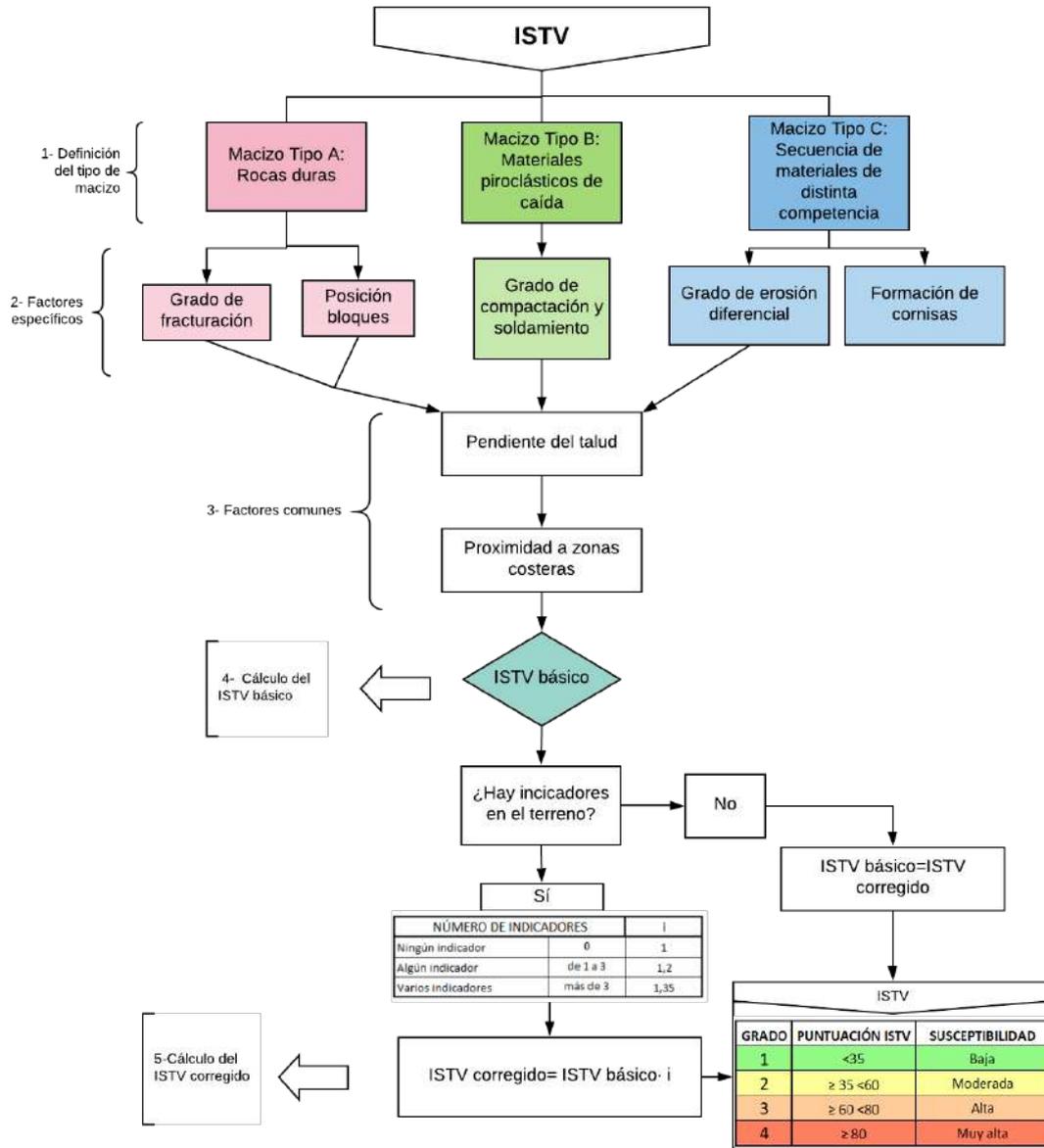


Figura II.1. Diagrama de flujo.

II.3. Definición de parámetros

En este apartado se define cada uno de los parámetros y se describe la metodología de toma de datos recomendada, que ha sido adaptada a las necesidades y capacidades de este índice, de manera que no sea necesario un instrumental específico y se pueda realizar rápidamente con la sencillez y la precisión que requiere una evaluación preliminar de este tipo.

Los factores se han clasificado en tres grupos: en primer lugar, los específicos para cada tipo de macizo, a continuación los factores comunes, que son aplicables a los tres tipos, y por último los indicadores en el terreno y en las infraestructuras.

Cada parámetro tiene una valoración que se indica en la última columna de los cuadros que se van a ir exponiendo a continuación. El índice ISTV básico se obtiene mediante la suma de la ponderación de los parámetros específicos y comunes y el ISTV corregido se obtiene aplicando el factor correspondiente a los indicadores que se observen sobre el terreno.

II.3.1. Factores específicos del tipo de macizo:

En base a las unidades geotécnicas y sus características (*ver Anejo I*), así como al tipo de problemática que puedan presentar, se ha realizado una clasificación de los taludes en tipos A, B o C. Cada tipo de macizo tiene unas características propias y unos parámetros a observar propios del material o materiales que lo forman y la manera en que se desencadenan las inestabilidades en cada caso. A continuación se describe cada tipo y los factores asociados a cada uno de ellos:

- **Taludes tipo A:** serán aquellos en los que predominen las rocas duras: coladas basálticas y sálicas (traquitas, fonolitas y riolitas) o piroclastos compactos como pueden ser tobas o ignimbritas soldadas, la figura II.2 muestra dos ejemplos de taludes tipo A. Como inestabilidades más frecuentes, estos taludes presentan desprendimientos por vuelco o caídas de bloques y chineo, y su principal problema, o causa de la inestabilidad, es la fracturación y diaclasado.



Figura II.2. Ejemplos de macizos tipo A. A la izquierda macizo basáltico y a la derecha talud en piroclastos sálicos.

- **Fracturación del macizo:** la fracturación del macizo rocoso está ligada al número y condiciones de las fracturas que afectan a los materiales geológicos que forman el macizo. Muchas de estas discontinuidades a las que llamamos fracturas no lo son, sino que se trata de diaclasado de retracción, una característica común a la mayoría de rocas volcánicas que se forman a partir del enfriamiento de un fundido (lava). A fin de simplificar, se adopta en esta clasificación el término fracturación para todas las discontinuidades planares que afectan al macizo rocoso.

Para el ISTV, la descripción de la fracturación del talud se realizará siguiendo el procedimiento del parámetro J_v , que contabiliza el número de discontinuidades en un metro cúbico del talud. Dado que un metro cúbico implica estimar tridimensionalmente las discontinuidades o fracturas, se puede determinar el J_v por el número de discontinuidades en una unidad de longitud en los casos en que el talud no permita observar ni estimar las discontinuidades en la tercera dimensión. En general, se tomará un metro lineal como unidad de longitud para el ISTV:

$$J_v = \frac{n^\circ \text{ de discontinuidades}}{\text{Longitud de medida}} \quad (\text{II.1})$$

Así, según el valor de J_v (ver Cuadro II.1), el macizo se definirá como masivo, poco fracturado, moderadamente fracturado o muy fracturado:

Cuadro II.1. Clasificación del macizo según su fracturación y puntuación a aplicar.

Nivel de fracturación	J_v (Nº descont./unidad de medida)	Puntuación ISTV
Masivo	<1	0
Poco fracturado	de 1 a 3	5
Moderadamente fracturado	de 3 a 10	20
Muy fracturado	>10	30

A continuación, se muestran imágenes de taludes con diferentes grados de fracturación, la figura II.3 presenta dos taludes, a la izquierda se encuentra un talud sin fracturación, constituido por ignimbrita soldada, que se puede definir como masivo, y a la derecha se observa un talud poco fracturado, de naturaleza basáltica, que presenta entre 1 y 3 discontinuidades por metro lineal.

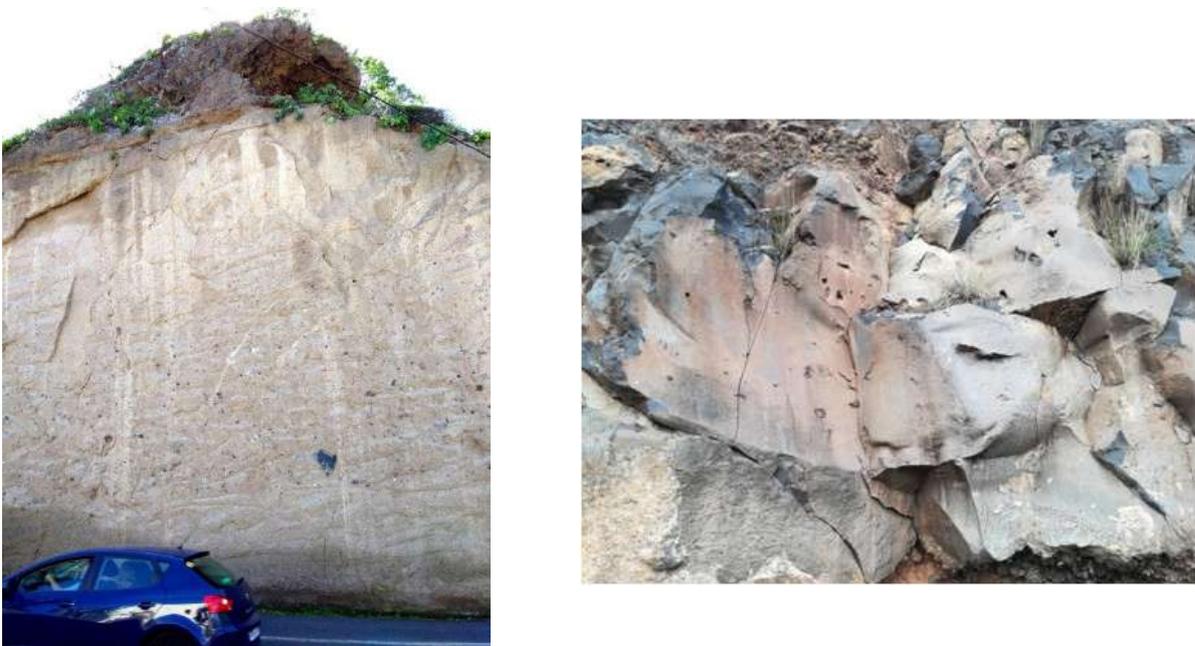


Figura II.3. Ejemplos de grados de fracturación. A la derecha macizo masivo, a la izquierda poco fracturado.

La figura II.4 muestra imágenes de taludes con grados de fracturación altos, a la derecha se observa un talud moderadamente fracturado, correspondiente a un macizo traquítico, con más de tres discontinuidades por metro lineal, mientras que a la izquierda se observa un macizo con un alto grado de fracturación, correspondiente a un dique basáltico, en el que hay discontinuidades en todos los sentidos y sin separación entre ellas.



Figura II.4. Ejemplos de grados de fracturación. A la derecha macizo moderadamente fracturado, a la izquierda muy fracturado.

- **Posición de los bloques:** es el segundo factor a tener en cuenta para los macizos tipo A, y se refiere a la inclinación y orientación de los bloques que forman los planos principales de discontinuidad en relación con la pendiente del talud.

Para la toma de datos se observará la orientación e inclinación de la estructura general del talud y de los planos que formen las discontinuidades o fracturas más importantes, describiendo si los bloques se inclinan a favor de la pendiente, favoreciendo la inestabilidad, o si por el contrario, la posición de los mismos dificulta que se produzca un desprendimiento.

Para la valoración de este parámetro se puntuará 0 la posición favorable a la estabilidad y con 10 la posición desfavorable a la estabilidad. Las figuras 5 y 6 muestran ejemplos de bloques cuya posición es desfavorable a la estabilidad.



Figura II.5. Ejemplo de talud en el que los planos de discontinuidad y la inclinación de la estructura, generan bloques cuya orientación favorece el desprendimiento por vuelco.



Figura II.6. Colada traquítica con pendiente muy elevada en la que los bloques tienen una orientación que favorece el desprendimiento por descalce.

- **Taludes tipo B:** Son macizos compuestos por depósitos de materiales piroclásticos tanto basálticos como sálicos, sueltos o débilmente soldados (conocidos como picón o pómez) (Figura II.7). Los desprendimientos característicos de este tipo de taludes son la caída de bloques y chineo, además de movimientos en masa (deslizamientos rotacionales).



Figura II.7. Ejemplos de macizos tipo B con distinto grado de soldamiento, a la izquierda con cierto grado de cohesión, y a la derecha piroclastos sueltos.

- **Compactación/soldamiento:** se refiere a la cohesión entre las partículas piroclásticas que conforman los macizos tipo B. El hecho de que un talud formado por materiales piroclásticos de caída esté más o menos compactado o soldado influye de manera relevante en su estabilidad, siendo más inestable a medida que disminuye su compactación y soldamiento.

El grado de compactación o soldamiento se obtiene con ayuda de un martillo de geólogo (Figura II.8), con el que se deberá tratar de extraer material del talud, y se clasificará según la resistencia del talud al arranque de material con esta herramienta como se detalla en la Cuadro II.2:

Cuadro II.2. Clasificación del macizo según su grado de compactación y puntuación a aplicar.

Grado de compactación/soldamiento	Descripción	Puntuación ISTV
Muy bajo	Se arranca fácilmente con la mano	35
Bajo	Se arranca fácilmente con el martillo	25
Medio	Se arranca con dificultad con el martillo	5



Figura II.8. Martillo de geólogo.

- Taludes tipo C:** Son macizos formados por secuencias de materiales de distinta competencia, como por ejemplo, alternancias entre niveles de compactos de lavas y niveles de escorias, o de piroclastos que se erosionan a ritmos distintos, la figura II.9 muestra dos ejemplos de este tipo de taludes. La erosión diferencial provoca que estos taludes sufran la caída de bloques por descalce.



Figura II.9. Ejemplos de macizos tipo C. A la izquierda se observa la alternancia de materiales y a la derecha formación de cornisas en el talud.

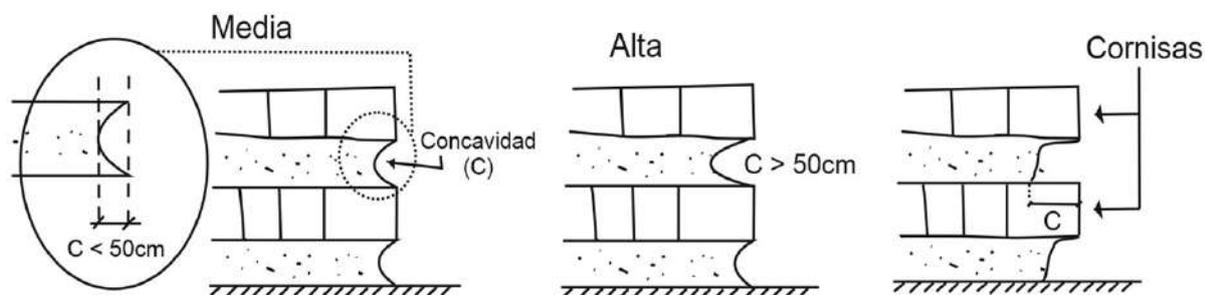
- **Erosión diferencial:** los diferentes materiales que conforman los macizos tipo C tienen características geológicas y resistencias distintas, lo que provoca que las capas se erosionen a distinto ritmo en función de su resistencia a los elementos erosivos. Esta erosión diferencial da lugar a la formación de cavidades o cornisas, que favorecen las inestabilidades. En caso de no encontrar erosión diferencial se observará el material predominante o el que sea más desfavorable para tratar el macizo como tipo A o B según proceda.

El grado de erosión diferencial se clasificará en medio, alto o con formación de cornisas (Cuadro II.3), dependiendo de la socavación máxima que presente la zona erosionada del talud o la formación de cornisas. La Figura II.10 explica gráficamente las diferencias entre los distintos niveles de erosión diferencial.

La medición de la profundidad de la zona erosionada, así como del tamaño de bloque se realizará de la forma más aproximada posible, por lo que los valores mostrados en el cuadro II.3 son aproximados.

Cuadro II.3. Clasificación del macizo según su grado de erosión diferencial y puntuación a aplicar.

Grado de erosión diferencial	Descripción	Puntuación ISTV
Bajo	Menos de 15 cm de erosión	0
Medio	Pequeñas concavidades en el material erosionado ($C < 50\text{cm}$)	15
Alto	Concavidades grandes ($C > 50\text{cm}$)	30
Formación de cornisas	Bloques muy pequeños ($\Phi \leq 0,2\text{m}$)	0
	Bloques pequeños ($0,2\text{m} < \Phi \leq 0,6\text{m}$)	10
	Bloques medianos ($0,6\text{m} < \Phi \leq 0,9\text{m}$)	30
	Bloques grandes ($0,6\text{m} < \Phi \leq 1,2$)	40



C= máxima socavación por erosión en cm.

Figura II.10. Esquemas de los niveles de erosión diferencial.



Figura II.11. Ejemplo de talud con erosión diferencial y formación de cornisas. Se observa que la erosión del material más blando ha dejado los bloques de

II.3.2. Factores comunes:

Los factores comunes afectan a cualquier tipo de macizo y son: la pendiente del talud, y la cercanía al mar, que se valorará sólo en el caso de un talud a menos de 50 metros del mar.

- **Pendiente del talud:** la inclinación del talud, es decir su pendiente, condiciona la estabilidad general. Para ponderar este factor se indicará si la pendiente del talud está dentro de los siguientes rangos: 45°-75° o de más de 75° en cuyo caso será un talud con pendiente subvertical como se indica en el Cuadro II.4:

Cuadro II.4. Clasificación del macizo según su pendiente y puntuación a aplicar.

Pendiente del talud	Descripción	Puntuación ISTV
45°-75°	Muy alta	10
>75°	Subvertical	20

- **Proximidad a la costa:** Si se trata de un talud en un acantilado costero o taludes o laderas sometidos a la acción erosiva del mar, se tendrá en cuenta este parámetro, penalizando con 10 puntos la estabilidad del macizo.



Figura II.12. Acantilado afectado por la erosión marina.

II.3.3. Indicadores en el terreno y en infraestructuras:

En muchas ocasiones el desencadenamiento de una inestabilidad va precedida de una serie de fenómenos precursores que se reflejan en el terreno o en las estructuras y que pueden indicar un proceso de inestabilidad activo. Los indicadores más frecuentes de inestabilidad observables en las laderas y taludes son:

- Grietas y escarpes.
- Abombamientos y deformaciones.
- Caída de rocas o presencia de cicatrices.
- Desvío de cauces.
- Acumulación de depósitos a pie de ladera o caída de tierras.

- Encharcamientos.
- Cambios en fuentes y en sugerencias de agua.
- Inclinación de árboles.

Cuando las deformaciones del terreno inciden en edificaciones e infraestructuras, se puede observar la presencia de las siguientes afectaciones a las mismas:

- Grietas en muros, cimentaciones y elementos estructurales.
- Inclinación y desplomes de muros.
- Roturas en conducciones.

La presencia de estos indicadores debe penalizar el valor de ISTV básico obtenido, para ello se utiliza un factor de corrección que multiplica el valor de ISTV básico por un *índice (i)* en función del número de indicadores que se encuentren en el talud (Cuadro II.5).

$$ISTV_{\text{corregido}} = ISTV_{\text{básico}} \cdot i \quad (II.2)$$

Cuadro II.5. Valores del índice *i* para la corrección del valor obtenido en el ISTV.

Número de indicadores		<i>i</i>
Ningún indicador	0	1
Algún indicador	de 1 a 3	1,2
Varios indicadores	más de 3	1,35

El resultado del ISTV, ya sea básico o corregido, alcanzará una valoración entre 0 y 100 puntos que permitirá clasificar los taludes según el grado de susceptibilidad a las inestabilidades en: bajo, moderado, alto o muy alto según se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro II.6. Valores del ISTV.

Grado	Puntuación ISTV	Susceptibilidad
1	< 35	Baja
2	≥35 < 60	Moderada
3	≥ 60 < 80	Alta
4	> 80	Muy Alta

II.4. Ficha de toma de datos

La Figura II.13 muestra una ficha de toma de datos que se propone para llevar a cabo la toma de datos sobre el terreno.

TIPO DE MACIZO															
TIPO A: ROCAS DURAS		TIPO B: DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS		TIPO C: SECUENCIA MATERIALES DE DISTINTA RESISTENCIA											
A.1. Grado de fracturación	Ptos	B.1. Grado de compactación/ soldamiento	Ptos	C.1. Grado de erosión diferencial	Ptos										
Masivo: < 1 junta/m ³	0	Alto		Bajo	0										
Poco fracturado: 1-3 juntas/m ³	5	Medio	0	Medio	15										
Moderadamente fracturado: 3-10/m ³	20	Bajo	5	Alto	30										
Muy fracturado: > 10 juntas/m ³	30	Muy Bajo	25												
A.2. Posición de los bloques con respecto a la inclinación del talud	Ptos		35	C.2. Formación de cornisas	Ptos										
- Favorable de la estabilidad	0			Bloques muy pequeños	0										
- Desfavorable a la estabilidad	10			Bloques pequeños	10										
				Bloques medianos	30										
				Bloques grandes	40										
P. PENDIENTE DEL TALUD		Z. ZONAS COSTERAS		i. INDICADORES DE INESTABILIDAD											
Pendiente predominante	Ptos	Taludes acantilados a menos de 50 m	Ptos		Núme i										
< 45°	0		10	Ningún indicador	0 1										
45° - 75° Muy Alta	10			Algún indicador	1 a 3 1,2										
> 75° Subvertical	20			Varios	> 3 1,35										
INDICADORES EN EL TERRENO O EN ESTRUCTURAS			CÁLCULO DEL ISTV												
Escarpes y grietas Abombamientos y deformaciones Bloques caídos o señales recientes de superficies de rotura Desvío de cauces Acumulación de depósitos a pie de ladera o caída de tierras Encharcamientos Cambios en fuentes y surgencias de agua Inclinación de árboles Grietas en muros, cimentaciones y elementos estructurales Inclinación y desplomes de muros Roturas en conducciones			$ISTV_{\text{básico}} = [(A1+A2) \text{ ó } B1 \text{ ó } (C1+C2)] + P + Z$ $ISTV = ISTV_{\text{básico}} \cdot i$												
			VALORES DEL ISTV												
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Puntuación</th> <th>SUSCEPTIBILIDAD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>< 35</td> <td>Baja</td> </tr> <tr> <td>35 – 59</td> <td>Moderada</td> </tr> <tr> <td>60 – 79</td> <td>Alta</td> </tr> <tr> <td>> 80</td> <td>Muy Alta</td> </tr> </tbody> </table>			Puntuación	SUSCEPTIBILIDAD	< 35	Baja	35 – 59	Moderada	60 – 79	Alta	> 80	Muy Alta
Puntuación	SUSCEPTIBILIDAD														
< 35	Baja														
35 – 59	Moderada														
60 – 79	Alta														
> 80	Muy Alta														
NOTAS															
1 - Valor máximo del índice ISTV: 100															
2 - No aplicable a suelos, depósitos de ladera o rocas muy meteorizadas o alteradas															
3 - La susceptibilidad indica la posibilidad de ocurrencia															
4 - Se elegirá sólo una de las opciones para el tipo de macizo: A, B o C															
5 - En el caso de macizos tipo C sin erosión diferencial, se elegirá entre los tipos A y B															
6 - Se elegirá solo una opción para cada parámetro en la asignación de puntuaciones															

Figura II.13. Ficha de obtención de datos para el campo.

II.5. Consideraciones finales

La susceptibilidad no indica una probabilidad de ocurrencia sino que trata de describir la posibilidad de que se produzca una inestabilidad bajo la influencia de determinadas condiciones que no se consideran en el análisis. Es decir, que a pesar de que un talud pueda presentar menor susceptibilidad que otro, puede tener mayor probabilidad de generar una inestabilidad si sus condiciones de contorno son más propicias para su desarrollo.

El resultado obtenido mediante el cálculo del índice de susceptibilidad de un talud permitirá valorar su estado de una manera previa y ofrecerá información sobre la conveniencia de realizar otros estudios adicionales de mayor intensidad y detalle. También permitirá establecer una relación ordenada de una serie de taludes que se encuentren dentro de un ámbito de actuación administrativa o geográfica que ayude a priorizar la realización de los estudios pormenorizados posteriores a aquellos taludes que se estimen más necesarios.

Por lo tanto, un resultado de susceptibilidad muy alta no implica necesariamente que el talud vaya a sufrir una inestabilidad de manera inminente sino que debe realizarse urgentemente un estudio más detallado por parte de técnicos expertos que valoren su importancia y alcance para, en su caso, establecer las medidas de estabilización y control correspondientes.

Por otro lado, debe considerarse que el resultado obtenido por un talud o ladera tampoco es permanente. Ya que son elementos dinámicos que están en constante cambio, por lo que la clasificación que se obtenga deberá ser actualizada cada cierto tiempo.

Anejo III. Método de evaluación rápida de estabilidad en suelos.

El propósito de este anejo es ofrecer un procedimiento que permita realizar un diagnóstico preliminar, sobre el terreno y de una manera rápida y sencilla de los procesos de inestabilidad que se pueden desencadenar en laderas y taludes formados por depósitos piroclásticos pomíticos de dimensiones granulométricas que pueden ir desde limos hasta grava. Además también servirá para identificar las zonas a pie de talud y en su coronación que podrían verse afectadas por la acumulación y retirada de material respectivamente.

III.1. Descripción del procedimiento

Para facilitar su aplicación se ha elaborado un formulario en el que se puede registrar toda la información que será necesario recopilar sobre el terreno para proceder a realizar la evaluación. Esta información es la siguiente:

1) Datos de caracterización morfológica del elemento a analizar como su altura (h) medida en metros y su pendiente (α) en grados sexagesimales, el tipo de inestabilidad que se podría desarrollar así como información sobre su ubicación.

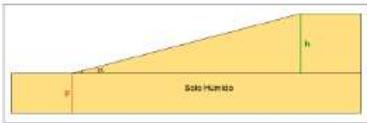
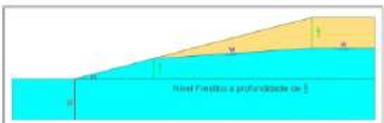
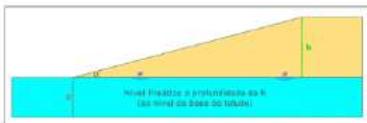
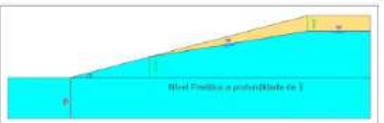
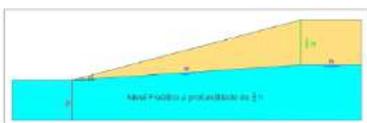
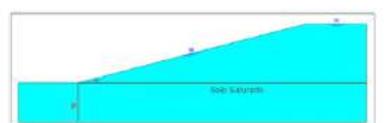
2) Parámetros de resistencia al corte necesarios para realizar el análisis de estabilidad. Este parámetro debe determinarse mediante pruebas de campo, ensayos de laboratorio o estimación empírica. En caso de no disponer de la información necesaria, en el apartado 3.5 del capítulo 3 de este documento se indica un procedimiento aproximado que sólo precisa de la realización de una granulometría para poder estimarlo empíricamente.

3) Para establecer el parámetro que representa el grado de presencia de agua en el talud se utilizaron los casos indicados en la Figura III.1 que define las posibles condiciones hidrológicas del terreno. De entre ellos deberá seleccionarse aquél que se considere que refleja mejor el nivel freático del terreno en el que se encuentra la ladera o talud considerado.

Para cada uno de los casos indicados en la Figura III.1 se ha elaborado una tabla con la que se puede obtener de una manera sencilla el Factor de Seguridad (FS). Dentro de cada una de las tablas se han establecido distintos grados de inclinación de la ladera entre 10° y 60° y distintas posibles alturas entre 5 m y 40 m. Entrando con estos valores en horizontal y con el ángulo de fricción interna en vertical que también se ha introducido con un rango

entre 20° y 45° se obtiene el valor del FS del talud. Estas tablas se adjuntan a la ficha de campo que se refleja en al siguiente apartado del presente anejo.

Figura III.1 Condiciones hidrológicas en función del nivel piezométrico del terreno.

	SUELO HUMEDO		$NP = \frac{1}{2} H$
	$NP = H$		$NP = \frac{1}{4} H$
	$NP = \frac{3}{4} H$		SUELO SATURADO

Para valores de FS inferiores a 1,5 tiene alta probabilidad el desarrollo de una inestabilidad en el talud por lo que resulta conveniente determinar las franjas de afección en coronación y a pie de talud del elemento estudiado que definen las zonas que se encuentran en riesgo de sufrir sus efectos con el fin de poder tomar las medidas necesarias para salvaguardar, en lo posible, la integridad de personas, propiedades e infraestructuras cercanas.

En el apartado 3.6 del capítulo 3 de este documento se expone el procedimiento seguido para establecer las franjas de afección y en la ficha de campo que aparece a continuación se facilita su cálculo mediante un esquema.

FICHA DE EVALUACIÓN RÁPIDA DE LA ESTABILIDADE DE TALUDES EN SUELO

Responsable del registro de datos: _____ Fecha: _____ - _____ - 20____

Talud o Ladera

Localización: _____

Coordenadas: N: _____ E: _____ Cota: _____ (m)

Altura (h): _____ (m) Pendiente (α): _____ (grados)

Geología: _____

Tipología de la inestabilidad:

Deslizamiento Translacional Rotacional Con rotura compuesta
 Flujo Detrítico Colapso Movimiento complejo Indeterminado

(Explicar el tipo de ocurrencia, posibles causas u origen y dibujar un croquis del talud en la parte posterior)

Geología: Parámetros de resistencia al corte

Existen datos o ensayos de laboratorio?

Sí (Introducir los datos) Cohesión (C')= _____ KPa Ángulo de fricción (Φ') = _____ ° (grados)

No Estimar Φ' por el tipo de materiales presentes / constituyentes del terraplén

Análisis granulométrico: _____ % grava _____ % arenas _____ % limos + arcillas

Estimar Φ' por la fórmula. Para suelos granulares $C' = 0$ KPa

$\Phi' = 0,138 * (\%grava + \%arena) + 27,7$

Ángulo de fricción (Φ') = _____ ° (grados)

Hidrología - presencia de agua (NP – Nivel Piezométrico)

Húmedo / NP=h NP = 3/4*h NP = 1/2*h NP = 1/4*h Saturado

Factor de Seguridad (F.S.)

Consulte la tabla adjunta para obtener una estimación de FS en función de los parámetros NP, h, α y Φ'

h (m)	α ° (grados)	Φ' ° (grados)	FS	< 1	< 1,5	>= 1,5
-------	---------------------	--------------------	----	-----	-------	--------

Si FS >= 1,5 - Talud estable, no presenta riesgo inmediato de inestabilidad

Si FS < 1,5 - Talud **potencialmente inestable** Estimar las franjas de seguridad

Franjas de Seguridad

(a) FRT Franja de Riesgo Superior
(b) FPT Franja de Protección Superior

(1) FRB Franja de Riesgo Inferior
(2) FPB Franja de Protección Inferior

(1) FRB_h<100m = 1* h ; FRB_h>100m = 1,5* h
(2) FPB_h<100m = 2* h ; FPB_h>100m = 2,5* h

SUPERIOR:

FRT = 0,65*h _____ (m)

FPT = 1,3*h _____ (m)

INFERIOR:

FRANJAS PARA H < 100 m

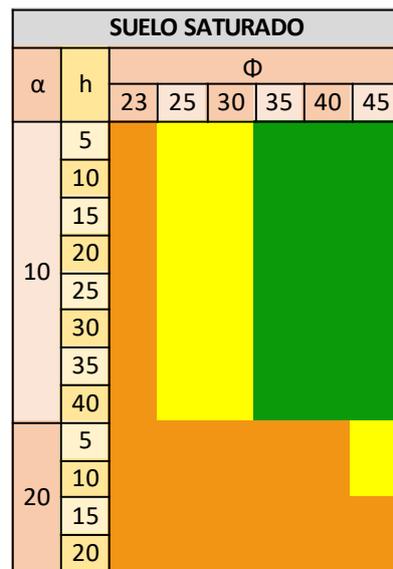
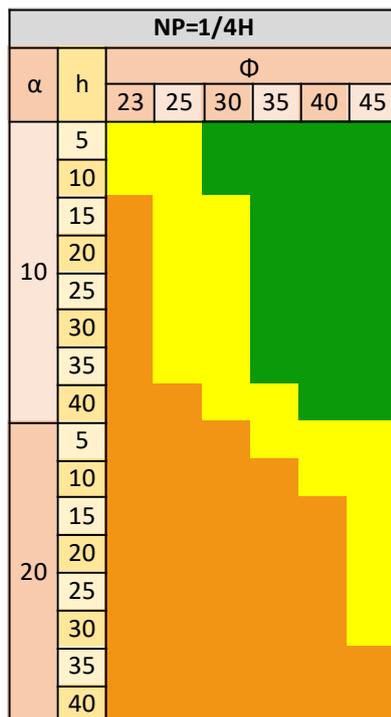
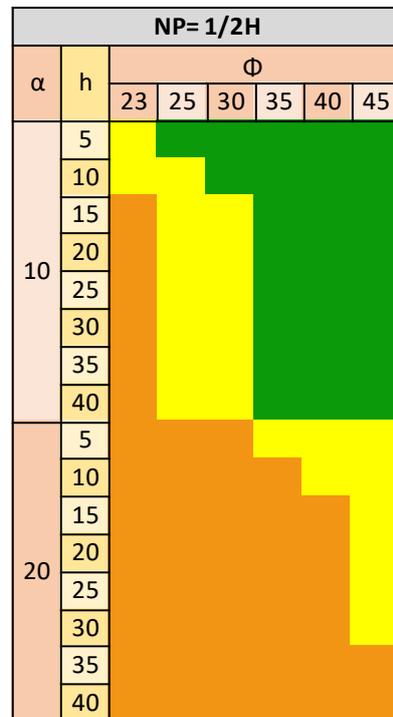
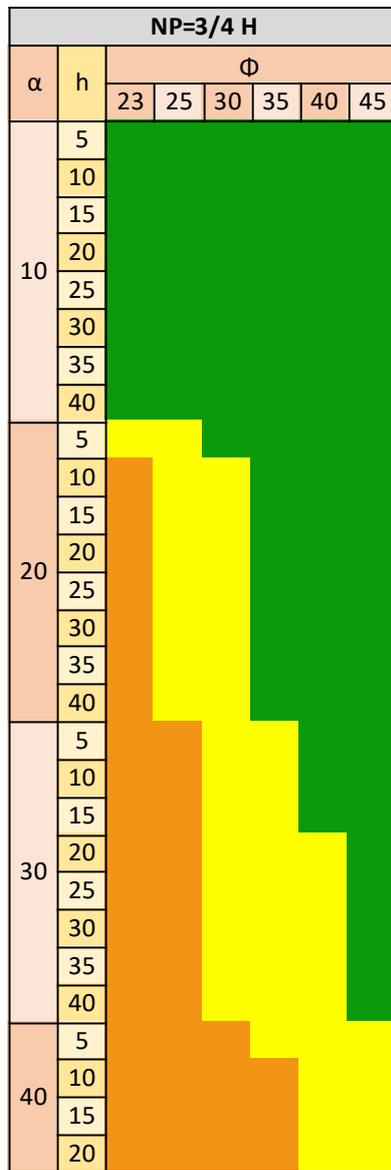
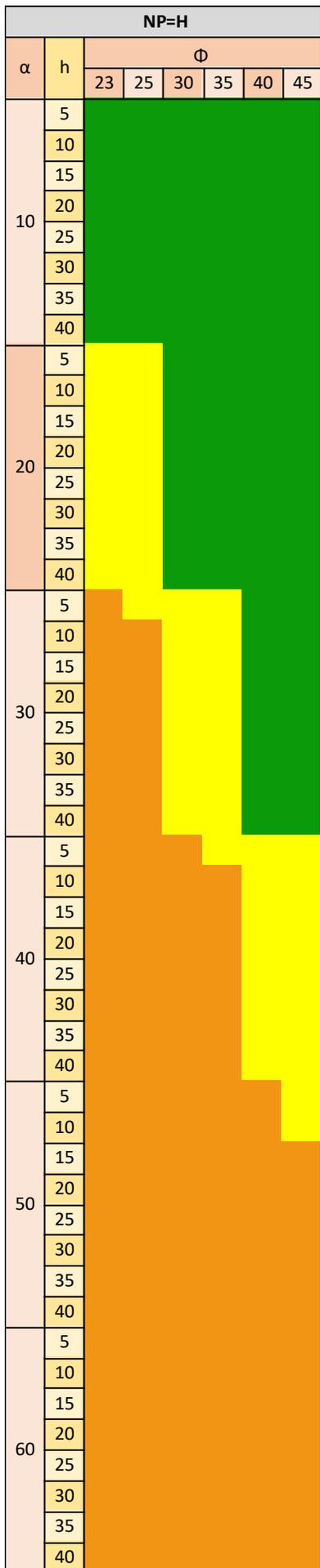
FRB_h<100 = 1*h _____ (m)

FPB_h<100 = 2*h _____ (m)

FRANJAS PARA H > 100 m

FRB_h>100 = 1,5*h _____ (m)

FPB_h>100 = 2,5*h _____ (m)



Hidrología - presencia de agua (NP – Nivel Piezométrico)

	<p>SUELO HÚMEDO</p>
	<p>NP=H</p>
	<p>NP=3/4 H</p>
	<p>NP=1/2H</p>
	<p>NP=1/4H</p>
	<p>SUELO SATURADO</p>

Anejo IV. Clasificación Geomecánica VSR (Volcanic Slope Rating).

IV.1. Origen de la Clasificación

El origen volcánico de las islas de la Macaronesia le confiere a sus macizos unas características geotécnicas bien diferenciadas de las que presentan los constituidos por materiales sedimentarios y metamórficos de otras regiones del mundo. Por este motivo, ninguna de las clasificaciones geomecánicas empleadas habitualmente tienen una adaptación eficiente a sus peculiaridades geológicas entre las que cabe destacar por su relevancia y especial incidencia:

- En el ámbito geomecánico, su heterogeneidad litológica y estructural, con alternancias de materiales de diferente competencia localizados en extensiones laterales, en ocasiones, muy reducidas
- En el ámbito geoestructural, la presencia de discontinuidades y sistemas de fracturación muy distintos debido a su génesis diversa así como de huecos y cavidades.

Las clasificaciones tradicionales sufren desajustes en macizos lávicos porque la roca matriz suele presentar una resistencia muy elevada que no influye de manera excesiva en la resistencia global del macizo debido a que el factor más determinante en este aspecto es la presencia de discontinuidades y heterogeneidades cuyas características y dirección resultan muy complejas de determinar debido a que una parte importante de ellas tienen origen térmico.

En cambio en los macizos piroclásticos, la influencia de las discontinuidades es escasa y la resistencia de la roca matriz es un parámetro muy poco concluyente debido a que este material, al estar conformado por una estructura de partículas no presenta un comportamiento predecible mediante un modelo continuo convencional.

Estas razones justifican la necesidad de disponer de herramientas específicas para poder determinar de una forma más adecuada la calidad del macizo rocoso volcánico y, en su caso, analizar el riesgo de un talud excavado en el mismo.

IV.2. Los parámetros de la Clasificación Geomecánica VSR

Esta clasificación presenta parámetros específicos para cada una de las tres tipologías en que se pueden clasificar los taludes de roca volcánica de la región: homogéneos formados por lavas, heterogéneos y homogéneos formados por piroclastos y escorias. La clasificación tiene aplicación en cada uno de ellos empleando cinco parámetros:

IV.2.1 Resistencia de la roca. La resistencia de la matriz rocosa y el grado de soldadura de los piroclastos vienen a tener una influencia similar en el comportamiento de estas dos tipologías de talud por lo que se han agrupado en un campo denominado “Resistencia de la roca”. La resistencia de la matriz rocosa se clasifica con el mismo criterio que el RMR (Bieniawski, 1989), con un rango que va desde <25 MPa a >250 MPa, mientras que el grado de soldadura de los piroclastos se clasifica en función de la dificultad que presente el material a la separación de sus partículas, ya sea manual o con un martillo de geólogo. En el caso de taludes heterogéneos se debe realizar la determinación para cada tipo de material y optar por tomar el valor que caracterice los estratos más débiles ya que serán éstos los que determinen la estabilidad del talud.

En el Cuadro IV.1 se definen los cinco rangos de resistencia propuestos en la clasificación. La primera fila es de aplicación a los taludes, o los estratos de taludes, formados por roca dura y la segunda a los formados por piroclastos.

Cuadro IV.1. Resistencia de la roca.

Matriz rocosa	> 250	250-100	100-50	50-25	< 25
Grado de soldadura del material granular	No pueden ser separados	Se separan con dificultad con la punta del martillo	Se separan al rasparlos con la punta del martillo	Se separan con dificultad con la mano	Se separan fácilmente con la mano

IV.2.2 Tamaño de bloque. Este parámetro representa el grado de fracturación del macizo rocoso que afecta a su estabilidad en cuanto que un talud será más inestable cuanto más fracturado esté. En el Cuadro IV.2 se definen los cinco tamaños de bloque empleados en la clasificación. Cuando se estudien taludes con grados de fracturación heterogéneos, será conveniente utilizar los valores más bajos observados que sean

representativos del talud con el fin de ofrecer un cierto margen de seguridad en el diagnóstico.

Cuadro IV.2. Tamaño de bloque.

VB m³	>10 m ³	0,2-10 m ³	0,01-0,2 m ³	0,0002-0,01 m ³	<0,0002 m ³
-------------------------	--------------------	-----------------------	-------------------------	----------------------------	------------------------

IV.2.3 Características de las discontinuidades. Se deben valorar las características más determinantes de las discontinuidades desde el punto de vista del comportamiento geomecánico del macizo como son la **rugosidad, continuidad y apertura** de las juntas. En el Cuadro IV.3 se definen las cinco variables empleadas para valorar cada una de ellas. De la misma manera que en el caso del volumen de bloque cuando los taludes muestren configuraciones heterogéneas de estos parámetros sería recomendable optar por el valor más bajo.

Cuadro IV.3. Características de las discontinuidades.

Rugosidad de las juntas	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Plana
Continuidad de las juntas (m)	< 1	1-3	3-10	10-20	> 20
Apertura de las juntas (mm)	cerrada	< 0,1	0,1-1	1-5	> 5

IV.2.4 Índice de Heterogeneidad (IH). Representa la existencia en un mismo macizo de capas con características geomecánicas diferentes, tanto en resistencia como en deformabilidad y susceptibilidad a la erosión. Un índice de heterogeneidad elevado es un síntoma de que el talud evolucionará a peor desde el punto de vista de la estabilidad, dada la diferente susceptibilidad a la erosión de los materiales que lo conforman. Además de que, ya por sí mismos, los planos de contacto entre diferentes materiales suponen zonas de debilidad en el macizo.

Para valorar la heterogeneidad del macizo de forma global, sobre todo teniendo en cuenta la aplicación de la clasificación en taludes, se propone una expresión sencilla que relaciona el número de alternancia de materiales presentes en un talud con su altura.

$$IH = \frac{N^{\circ} \text{decambios de material} * 100}{\text{Altura del Talud}} \quad (IV.1)$$

Igual que en los parámetros anteriores en el cuadro IV.4 se han definido cinco rangos de valores que se emplearán para aplicar la clasificación VSR.

Cuadro IV.4. Índice de heterogeneidad del macizo.

0	1-35	35-70	70-100	> 100
---	------	-------	--------	-------

IV.2.5 Índice de Regularidad (IR) de la superficie. Este parámetro refleja dos aspectos muy importantes en la litología de las rocas volcánicas: la erosionabilidad de las capas y la presencia de huecos. Estos últimos referidos tanto a cavidades volcánicas como a viseras por erosión.

Es un parámetro muy relevante ya que los taludes que presentan una irregularidad elevada se muestran muy inestables al haber muchos bloques y viseras descalzados. El Cuadro IV.5 muestra las distintas observaciones a tener en cuenta para definir este índice.

Cuadro IV.5. Índice de regularidad.

Muy regular	Regular	Irregular	Bastante irregular	Muy irregular
Superficie lisa, sin capas erosionables ni huecos o viseras	Pocas irregularidades algunos huecos o viseras de profundidad <25 cm Alguna capa algo erosionable	Bastantes huecos o viseras de 25 a 50 cm de prof. Varias capas susceptibles a la erosión.	Más del 50% del taud ocupado por huecos, cavidades o viseras de 50 cm a 1m. Algunas capas con alta susceptibilidad a la erosión	Más del 50% del talud ocupado por cavidades o viseras de profundidad >1m Muchas capas con alta susceptibilidad a la erosión.

IV.3. Aplicación de la Clasificación Geomecánica VSR

El objetivo de la clasificación es obtener el grado de estabilidad de un talud de manera sistemática, rápida y facilitar que el resultado del diagnóstico sea adecuado e independiente de la subjetividad del técnico que realice la inspección.

Todas las características del talud mencionadas anteriormente que conforman la Clasificación Geomecánica VSR se recogen en el Cuadro IV.6 que muestra la clasificación completa en la que se asigna una ponderación a cada una de las variables en función del grado en que el técnico defina cada uno de los parámetros observados.

Es decir que, a partir de la toma de datos de campo se deberá valorar el grado de cada uno de los parámetros que definen el talud y sumar los puntos correspondientes a cada uno de ellos con lo que finalmente se obtendrá un total que tendrá una equivalencia con el grado de estabilidad del talud o ladera. El grado de estabilidad tiene una configuración similar al RMR de forma que se le han asignado valores entre I y V, representando el primero el mayor grado de estabilidad y siendo V el valor pésimo.

Cuadro IV.6. Clasificación geomecánica.

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA PARA TALUDES EN ROCAS VOLCÁNICAS (VSR)						
Resistencia de la roca	Matriz rocosa	> 250	250-100	100-50	50-25	< 25
	Grado de soldadura del material granular	No pueden ser separados	Se separan con dificultad con la punta del martillo	Se separan al rasparlos con la punta del martillo	Se separan con dificultad con la mano	Se separan fácilmente con la mano
	Puntos	13	8	5	2	0
Tamaño del bloque	VB m³ (cubo de lado cm)	>10 m ³ (200 cm)	0,2-10 m ³ (200 cm)	0,01-0,2 m ³ (200 cm)	0,0002-0,01 m ³ (200 cm)	<0,0002 m ³ (200 cm)
	Puntos	4	3	2	1	0
Características de las discontinuidades	Rugosidad de las juntas	Muy rugosas	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Plana
	Puntos	12	8	5	2	0
	Continuidad de las juntas (m)	< 1	1-3	3-10	10-20	> 20
	Puntos	16	12	8	4	0
	Apertura de las juntas (mm)	cerrada	< 0,1	0,1-1	1-5	> 5
Puntos	16	12	8	4	0	
Índice de heterogeneidad (IH)		0	1-35	35-70	70-100	> 100
	Puntos	6	4	2	1	0
Índice de regularidad (IR)		Muy regular	Regular	Irregular	Bastante irregular	Muy irregular
	Puntos	40	30	20	10	0
Total		100-80	80-60	60-40	40-20	20-0
Grado de estabilidad		I	II	III	IV	V
ESTABLE ←—————→ INESTABLE						

Un talud con grado de estabilidad V será aquel en el que se ya se este desencadenando o se haya producido algún fenómeno importante de inestabilidad.

En un talud de grado de estabilidad IV existirán evidentes signos de inestabilidad como: bloques caídos de gran tamaño, bloques en situación inestable en la ladera, importantes grietas en coronación, signos de eventos recientes de rotura.

Con grado de estabilidad III se designarán aquellos taludes que presenten algún tipo de inestabilidad de escasa o media importancia como: bloques caídos de tamaño decimétrico, o presencia de paquetes en voladizo.

El grado de estabilidad II será el que presenten los taludes estables, sin ningún signo de inestabilidad importante, más allá de leves acumulaciones de depósitos finos en su pie.

El grado de estabilidad I será asignado a taludes totalmente estables, sin ningún signo de estabilidad visible ni depósitos de ningún tipo en su pie. Estos taludes no presentarán bloques sueltos ni caídas, incluso ligeras, de cantos.

Anejo V. Índice de riesgo de caída de rocas en taludes volcánicos (IRTV).

V.1. Introducción.

El Índice de riesgo de caída de rocas en taludes volcánicos IRTV propone un método de estimación cualitativa de este riesgo en un talud o zona determinada, expresado en función de la probabilidad anual de caída de rocas cuyas consecuencias puedan producir unas pérdidas materiales determinadas. Este índice es aplicable a taludes o laderas carentes de medidas de protección o de estabilización en zonas de permanencia.

Su objetivo es proporcionar una evaluación preliminar del nivel de riesgo, aportando criterios para la sectorización y priorización de actuaciones. Para el diseño de medidas específicas de protección se requiere cuantificar tanto el riesgo (QRA) como los parámetros de diseño (SEL, MEL, etc.).

Para el cálculo del IRTV es necesario estimar la probabilidad de caída de rocas. Este parámetro puede determinarse directamente in situ o a partir del historial de eventos de caídas registrados. Si no se dispone de esa información, se puede estimar el dato mediante la correlación entre el grado de susceptibilidad ISTV y la frecuencia de caída de rocas que se indica en el Cuadro V.1.

En los casos en los que no sea aplicable el ISTV, por ejemplo en suelos, depósitos de ladera o coluviales, rocas muy alteradas, rocas con presencia de cavidades grandes o cuevas (ver *Anejo II*), la valoración del grado de estabilidad del talud y la posible frecuencia de caídas de rocas, deberán ser estimadas por un profesional competente, que aporte esta información.

El IRTV se expresa en función de la peligrosidad (P) y el índice de pérdidas (IP), según la expresión:

$$\text{IRTV} = P \cdot \text{IP} \quad (\text{V.1})$$

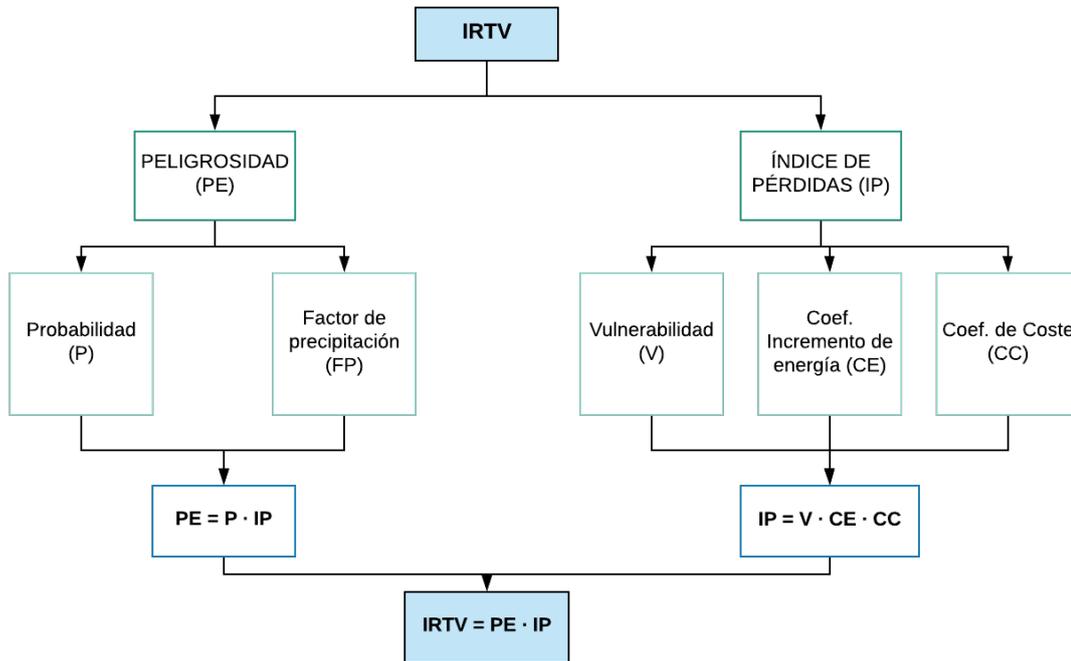


Figura V.1. Diagrama de flujo para la estimación del IRTV.

V.2. Estimación de la peligrosidad:

La peligrosidad representa la probabilidad de que ocurra un proceso de determinada intensidad o magnitud en un lugar determinado y en un periodo de tiempo dado. La componente temporal de la peligrosidad puede ser también expresada a partir del periodo de retorno del proceso de que se trate ($T = 1/P$) pudiendo estimarse en función de la probabilidad anual (P_y) o bien en función de la probabilidad durante la vida útil del elemento expuesto (P_n). Para el cálculo del IRTV se ha considerado como referencia la vida útil de una vivienda estimada en 70 años (n), aunque igualmente podría expresarse en función de cualquier otro valor de vida útil o por año.

La peligrosidad depende del grado de estabilidad del talud, estimado a través del ISTV descrito en el *Anejo II*, y la incidencia de precipitaciones de determinada intensidad, como factor desencadenante, expresado en función del Factor de precipitaciones (FP), según la expresión:

$$P = P_n \cdot FP \quad (V.2)$$

donde P_n es la probabilidad de caída de rocas en n años y FP el factor de precipitación.

-Probabilidad (P_n): En el Cuadro V.1 se indican las equivalencias entre el grado de susceptibilidad frente a la inestabilidad del talud ISTV y el período de retorno asociado, en caso de no disponer del análisis de ISTV es posible obtener el período de retorno a partir de los datos de frecuencias de caídas que se muestran en este cuadro.

El cuadro V.2. indica la probabilidad de caída de rocas asociada a cada periodo de retorno y a cada grado de ISTV. Estas equivalencias se han basado en la frecuencia de eventos de caída de rocas en taludes de la isla de Tenerife, en los cuales se determinó el ISTV. Para valores de ISTV comprendidos entre los intervalos del Cuadro V.2 se podrá interpolar estimándose la probabilidad mediante la siguiente expresión:

$$P_n = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (V.3)$$

donde P_n es la probabilidad de caída en n años, T es el período de retorno y n el número de años.

Cuadro V.1. Obtención de T en función del ISTV o la frecuencia de caída de rocas.

ISTV		Frecuencia de caídas		
Puntos	Susceptibilidad	Observaciones de campo (1)	Historial de eventos de caídas de rocas (2)	T (años)
< 35	Baja	No se observan bloques caídos	Sin registros de caídas de rocas en la zona	≥ 100
35 – 59	Moderada	Algún bloque caído de pequeño o mediano tamaño	Sin registros de caídas de rocas en la zona	> 50
60 – 79	Alta	Varios bloques caídos de distinto tamaño	Algún registro de caídas en los últimos 25 años	> 25
≥ 80	Muy Alta	Numerosos bloques caídos de distinto tamaño	Varios registros de caídas en los últimos 25 años	≤ 25

(1) Observación in situ de bloques caídos, señales de inestabilidad y roturas en áreas fuentes. Se excluyen los bloques o fragmentos de roca de pequeño tamaño, chineo, etc. Se incluyen también las zonas próximas a las áreas fuente y las zonas altas y bajas de la ladera.
(2) A partir de datos registrados en carreteras, informes técnicos, ayuntamientos, testigos, hemerotecas, datos bibliográficos, fotografías, etc.
T = período de retorno

Cuadro V.2. Probabilidad de caída de rocas estimadas a partir del ISTV.

ISTV		Probabilidades			Grado
Puntos	Susceptibilidad	T (años)	Py	Pn	
< 35	Baja	> 100	< 0.01	< 0.5	Poco probable
≥ 35 <60	Moderada	≤ 100 > 50	≥ 0.01 < 0.02	≥ 0.5 < 0.75	Probable
≥ 60 <80	Alta	≤ 50 > 25	≥ 0.02 < 0.04	≥ 0.75 < 0.94	Muy probable
≥ 80	Muy Alta	≤ 25	≥ 0.04	≥ 0.94	Altamente probable

T= período de retorno.

Py= Probabilidad anual de excedencia.

Pn= Probabilidad de ocurrencia en n años. "n" es la vida útil de una vivienda o instalación. Se ha tomado como referencia 70 años.

-Factor de precipitaciones (FP): Este factor tiene en cuenta el incremento de la probabilidad de caída de rocas por precipitaciones a partir de determinados rangos de intensidad pluviométrica referidos a una zona y a un período de tiempo determinado. Este factor se ha estimado de acuerdo con el régimen de precipitaciones indicado en la Guía CLIMCAN (2010), y al estudio de la frecuencia de caída de rocas obtenido a partir de la base de datos del Cabildo de Tenerife. En el Cuadro V.3 se indican los intervalos de precipitación media anual y su correspondiente factor de precipitaciones. En los casos en los que la cabecera y el pie del talud presenten regímenes de precipitación distintos, se tomará el más desfavorable.

Cuadro V.3. Factor de precipitaciones (FP).

Factor de precipitaciones (FP)			
Precipitación media anual (mm)	<300	< 300 <500	> 500
Factor (FP)	1,0	1,7	2,0

- Grado de peligrosidad (P): Multiplicando la probabilidad (P_n) obtenida, por el factor de precipitaciones (FP), como indica la ecuación V.2, se obtiene el grado de peligrosidad. En el Cuadro V.4 se muestran los grados de peligrosidad establecidos.

Cuadro V.4. Grados de peligrosidad (P) referidos a la probabilidad (P_n), y al factor de precipitaciones (FP).

Peligrosidad (P)	
Peligrosidad ($P_n \cdot FP$)	Grado de Peligrosidad
< 0,5	Baja
$\geq 0,5 < 1$	Moderada
$\geq 1 < 1,5$	Alta
$\geq 1,5$	Muy Alta
$n= 70$ años	

V.3. Índice de pérdidas (IP).

Corresponde a las pérdidas esperables (económicas) y que dependen de la vulnerabilidad de los elementos expuestos frente al proceso de que se trate, y de su coste. Viene definido por la siguiente expresión:

$$IP = V \cdot CE \cdot CC \quad (V.4)$$

donde V es vulnerabilidad, CE es el coeficiente de incremento de energía de impacto y CC el coeficiente de coste.

- Vulnerabilidad (V): Grado de daño que puede sufrir un elemento expuesto a un peligro de determinada intensidad. Si el elemento a proteger se encuentra en la zona de posible exposición, se considera que es vulnerable. Esta vulnerabilidad será mayor en función del elemento de que se trate, según el porcentaje de elemento que pueda verse afectado y de la magnitud o intensidad del proceso. Se puede expresar en una escala de 0 a 1 o en tanto por ciento. En el Cuadro V.5 se sugieren algunos intervalos de vulnerabilidad frecuentes, que deberán estimarse en cada caso.

Cuadro V.5. Intervalos de vulnerabilidad frecuentes para zonas de permanencia.

Vulnerabilidad (V)	
Tipo de elemento	Valores frecuentes de vulnerabilidad
Viviendas	0,2-0,8
Núcleos urbanos	0,1-0,2
Instalaciones industriales	0,1-0,2
Zonas recreativas	0,1-0,3

Una vez se haya comprobado que el elemento está expuesto al riesgo, se procederá a realizar una inspección del talud observando el tamaño de los bloques susceptibles de caer, la distancia relativa entre el elemento a proteger y el talud o la zona fuente, y en función del tipo y calidad de la construcción de dicho elemento, se asignará un valor entre 0 y 1 de vulnerabilidad a criterio del técnico.

- Coefficiente de incremento de energía (CE): Este coeficiente tiene en cuenta el incremento de energía de impacto por efecto de la altura del talud. Los incrementos de energía están tomados con respecto a un talud de 5m de altura, asumiendo que el inicio de la caída de rocas se da en el punto más alto del talud. En el cuadro V.6 se indican los coeficientes de energía sugeridos.

Cuadro V.6. Coeficientes de incremento de energía.

Coeficiente de incremento de energía (CE)		
Altura talud (m)	Energía de impacto	CE en rocas
≤ 5	Baja	1
≤ 10	Moderada	1,5
≤ 30	Alta	2,5
> 30	Muy alta	3,5

- Coeficiente de coste (CC): Tiene en cuenta el coste o pérdidas económicas como consecuencia de un evento de caída de rocas. En el cuadro V.7 se indican los coeficientes de coste y el grado de pérdidas potenciales asociadas.

Cuadro V.7. Coeficiente de coste en función coste de reposición del elemento expuesto y el grado de pérdidas potenciales asociadas para varios intervalos de coste.

Coeficientes de Coste (CC)		
Coste € ($\cdot 10^3$)	Grado de pérdidas	Coeficiente de coste (CC)
< 50	Bajas	1,0
50 - 200	Medias	3,0
200 - 1000	Altas	8,0
> 1000	Muy altas	15- 20

-Cálculo del índice de pérdidas (IP): Se multiplican estos tres parámetros y se obtiene el índice de pérdidas (IP) de acuerdo con la expresión:

$$IP=V \cdot CE \cdot CC. \quad (V.5)$$

En el cuadro V.8 se indican los valores de IP y el grado de pérdidas asociado.

Cuadro V.8. Índice de pérdidas.

Índice de pérdidas (IP)	
IP	Grado de pérdidas
≤ 2	Bajas a muy bajas
≤ 4	Moderadas a altas
≤ 8	Altas
>8	Muy altas

La figura V.2 muestra los cuadros para el cálculo del IRTV como ficha de campo para facilitar su aplicación.

Probabilidades (Pn) para edificaciones					Factor de precipitaciones (FP)				Grado Peligrosidad (PE)	
Susceptibilidad ISTV	T (años)	Py	Pn	Posibilidad de afectación a la estructura	Precipitación (mm/año)	<300	<500	> 500	Peligrosidad (Pn·FP)	Grado de Peligrosidad
(< 35) Baja	> 100	< 0,01	< 0,5	Baja-Moderada	Factor (FP)	1	1,7	2	< 0,25	Baja
(≥ 35 <60) Moderada	≤ 100 > 50	≥ 0,01 < 0,02	≥ 0,5 < 0,75	Alta	T= período de retorno. Pn= Probabilidad de ocurrencia en n años a partir de la expresión $P_n = 1 - (1 - 1/T)^n$. "n" es la vida útil de una vivienda o instalación. Se ha tomado como referencia 70 años.				≥ 0,25 < 0,5	Moderada
(≥ 60 <80) Alta	≤ 50 > 25	≥ 0,02 < 0,04	≥ 0,75 < 0,94	Muy alta	Py= Probabilidad anual de excedencia.				≥ 0,5 < 0,75	Alta
(≥ 80) Muy Alta	≤ 25	≥ 0,04	≥ 0,94						≥ 0,75	Muy Alta
Vulnerabilidad (V)		Coeficiente de incremento de energía (CE)			Coeficientes de Coste (CC)		Índice de pérdidas (IP)			
Tipo de elemento	Valores frecuentes de vulnerabilidad	Altura talud (m)	Energía de impacto	CE en rocas	Coste € (·10 ³)	Coeficiente de coste (CC)	IP (V·CE·CC)	Grado de pérdidas		
Viviendas	0,2-0,8	≤ 10	Bajo	1	< 50	1	≤ 2	Bajas a muy bajas		
Núcleos urbanos	0,1-0,2	≤ 20	Moderada	1,5	< 200	3	≤ 4	Moderadas a altas		
Instalaciones industriales	0,1-0,2	≤ 30	Alta	2,5	< 1000	8	≤ 8	Altas		
Zonas recreativas	0,1-0,3	> 30	Muy alta	3,5	> 1000	15- 20	> 8	Muy altas		

Figura V.2. Ficha de aplicación del IRTV.

V.4. Cálculo del IRTV:

El índice IRTV se obtiene mediante la expresión:

$$\text{IRTV} = P \cdot \text{IP}. \quad (\text{V.6})$$

En el Cuadro V.9 se muestran los niveles de riesgo sugeridos a partir del IRTV, en función del grado de pérdidas y del grado de probabilidad, así como la prioridad de actuación para cada nivel de riesgo y las recomendaciones en cada caso.

Cuadro V.9. Niveles de riesgo en función del IRTV.

Grado de Pérdidas	Muy Alto					<table border="1"> <thead> <tr> <th>Grado de Riesgo</th> <th>Recomendaciones</th> <th>Prioridad de actuación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A - Bajo o Muy bajo</td> <td>Ninguna, salvo incidencias</td> <td>Baja o no requiere</td> </tr> <tr> <td>B - Moderado</td> <td>Inspección y estimación preliminar</td> <td>A medio plazo</td> </tr> <tr> <td>C - Alto o Muy alto</td> <td>Inspección detallada por técnico competente</td> <td>A corto o muy corto plazo</td> </tr> </tbody> </table>	Grado de Riesgo	Recomendaciones	Prioridad de actuación	A - Bajo o Muy bajo	Ninguna, salvo incidencias	Baja o no requiere	B - Moderado	Inspección y estimación preliminar	A medio plazo	C - Alto o Muy alto	Inspección detallada por técnico competente	A corto o muy corto plazo
	Grado de Riesgo	Recomendaciones	Prioridad de actuación															
	A - Bajo o Muy bajo	Ninguna, salvo incidencias	Baja o no requiere															
	B - Moderado	Inspección y estimación preliminar	A medio plazo															
C - Alto o Muy alto	Inspección detallada por técnico competente	A corto o muy corto plazo																
Alto																		
Mod.																		
Bajo																		
		Bajo	Mod.	Alto	Muy Alto	Grado de Peligrosidad												

Anejo VI. Clasificación VRHRS de riesgos frente a desprendimientos para taludes en rocas volcánicas.

VI.1 Introducción:

Para las zonas de tránsito se ha desarrollado en esta Guía la Clasificación VRHRS (Volcanic Rockfall Hazard Rating System) que parte del resultado obtenido en la aplicación de la Clasificación Geomecánica para taludes en rocas volcánicas VSR expuesta en el Anejo IV. Consiste en aplicar sobre el diagnóstico de estabilidad dos factores de ajuste que incorporan al análisis de riesgo la peligrosidad del talud y el grado de exposición del elemento a proteger cuando atraviesa la zona de estudio.

Previamente se realiza una transformación matemática del índice resultante de la aplicación de la clasificación VSR para obtener el índice VRHRS_{básico} que representa de la misma manera la calidad y grado de estabilidad general del macizo rocoso. Para ello se parte de la puntuación obtenida en la clasificación VSR transformándola mediante la siguiente expresión que deberá redondearse al valor entero inferior:

$$\text{VRHRS}_{\text{básico}} = 200 \cdot e^{-0,034 \cdot \text{VSR}} \quad (\text{VI.1})$$

A modo indicativo, en la siguiente tabla, se pueden observar los valores de VRHRS básico obtenidos para distintos valores de VSR:

Cuadro VI.1. Relación entre VSR y VRHRS básico.

Grado de estabilidad VSR	VRHRS básico
10 (GRADO V)	142
30 (GRADO IV)	72
50 (GRADO III)	36
70 (GRADO II)	18
90 (GRADO I)	9

Y a continuación se aplica al índice obtenido un ajuste por peligrosidad del talud (F_1) y un ajuste por exposición (F_2) utilizando la siguiente expresión:

$$VRHRS = VRHRS_{\text{básico}} + F_1 + F_2 \quad (VI.2)$$

El **factor de ajuste por peligrosidad** del talud se obtiene como suma de las puntuaciones parciales obtenidas para cada uno de los siguientes parámetros:

- Altura del talud
- Efectividad de la cuneta de recepción
- Anchura de la calzada, incluido el arcén
- Tamaño del bloque individual/Volumen de rocas por evento
- Clima y presencia de agua en el talud
- Historial de eventos o caída de bloques

El **factor de ajuste por exposición** del elemento o conjunto de elementos vulnerables a proteger se obtiene como suma de las puntuaciones parciales obtenidas para cada uno de los siguientes parámetros de evaluación:

- Riesgo medio vehicular.
- Porcentaje de visibilidad frente a la distancia de reacción.

Al igual que se establece en el método de Oregón RHRS (Rockfall Hazard Rating System, Pierson 1990), cada uno de los parámetros incluidos en los factores de ajuste se valoran de forma exponencial según la siguiente expresión matemática:

$$y = 3^x \quad (\text{donde } x = 1, 2, 3 \text{ ó } 4) \quad (VI.3)$$

El valor obtenido por cada uno de los parámetros estudiados se acumula en el factor de ajuste al que corresponde y finalmente estos factores se suman al VRHRS básico tal y como indica la expresión VI.2 anterior. Para facilitar la aplicación del método se ha confeccionado la tabla que se expone en el apartado VI.4 de este anejo, la cual facilita el registro de la ponderación obtenida para cada uno de los parámetros mencionados.

A continuación se define cada uno de los parámetros anteriores y se proponen varias expresiones matemáticas para obtener el valor de x de una forma analítica.

VI.2 Parámetros de ajuste por peligrosidad:

Este ajuste introduce en el análisis de riesgos, a través de 6 parámetros, los factores que puedan influir en que aumente la probabilidad de que se produzca el desprendimiento así como la intensidad de sus efectos.

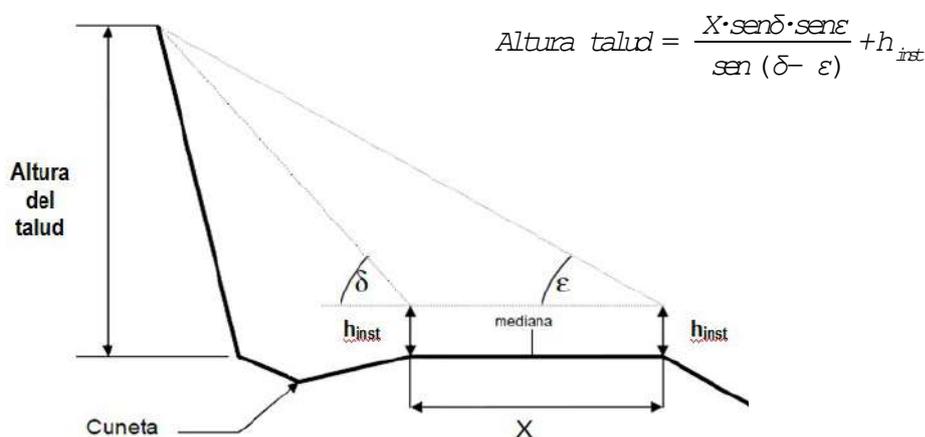
VI.2.1. La altura del talud.

Este parámetro correlaciona el riesgo con la altura total del talud. Los bloques de rocas que caen de mayor altura poseen mayor energía potencial que aquellos similares que se pueden desprender desde una menor altura, de forma que los primeros provocarán mayores daños y, por tanto, representan un riesgo mayor por lo que deberán recibir una mayor ponderación en el análisis de riesgos.

Se considerará altura del talud a la correspondiente al punto más alto desde el que se estima que puedan desprenderse o caer rocas. En este sentido, si se detectara la posibilidad de caída de rocas desde alguna zona de la ladera natural ubicada por encima del talud de desmonte de la carretera, se considerará ésta a efectos de la altura vertical a considerar.

Para poder medir la altura del talud en campo utilizando un clinómetro o una brújula de geólogo, se podrá emplear la siguiente expresión matemática resultante de la construcción gráfica que se muestra a continuación:

Figura VI.1. Cálculo de la altura del talud.



donde:

- X es la distancia entre los puntos de medida del ángulo. Se recomienda considerar los bordes de la calzada.
- δ es el ángulo que forma con la horizontal la línea que une el punto de medida más cercano al talud con el punto más alto desde el que pueden producirse desprendimientos.
- ε es el ángulo que forma con la horizontal la línea que une el punto de medida más lejano con el punto más alto del talud desde donde pueden producirse desprendimientos.
- H_{inst} es la altura del instrumento utilizado para la medida.

Para determinar la ponderación de este parámetro que deberá ser acumulado en el factor de ajuste por peligrosidad se podrá utilizar la siguiente expresión:

$$X = \frac{\text{Altura (m)}}{7,5} \quad (\text{VI.4})$$

VI.2.2. Efectividad de la cuneta de recepción.

La eficacia de una cuneta es medida por su capacidad para limitar que el material desprendido llegue a la carretera. En función de la pendiente del talud pueden darse tres tipos de trayectorias de las rocas durante su caída:

- Caída Directa o Libre: para taludes con pendiente 1H:4V o más inclinados.
- Rebote: para taludes con pendiente de alrededor 1H:2V.
- Rodadura y deslizamiento: para taludes con pendiente 1H:1V o más tendidos.

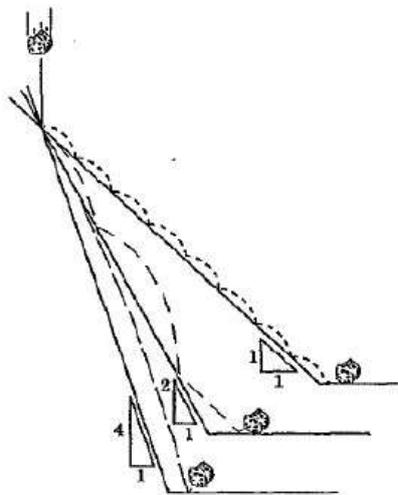


Figura VI.2. Tipos de caída de rocas según la pendiente del talud.

En la estimación de la efectividad de la cuneta, el evaluador deberá considerar varios factores como:

- 1) Altura y ángulo del talud
- 2) Ancho, profundidad y forma de la cuneta
- 3) Estimación del tamaño de bloque o volumen de material susceptible de desprenderse
- 4) Impacto o influencia de las irregularidades de la pendiente (características de lanzamiento) en la caída de rocas.

Conviene destacar que la presencia de salientes que puedan modificar la trayectoria del bolido durante su caída desviándolo hacia la calzada es de vital importancia ya que pueden anular por completo los beneficios esperados por la presencia de la cuneta. Por ello resulta fundamental detectar posibles irregularidades como bermas, salientes, viseras, cavidades, etc. y considerar su efecto sobre posibles variaciones de trayectoria.

Para conocer la efectividad de una cuneta siempre es recomendable contar con la información que pueda tener el personal de conservación y mantenimiento de la vía.

La puntuación de dicho parámetro se podrá llevar a cabo atendiendo a las indicaciones del Cuadro VI.2.

Cuadro VI.2. Ponderación de los niveles de captación de la cuneta de carreteras. (Fuente: *The Rockfall Hazard System, Lawrence A. Pierson. Oregon Department of Transportation*)

PONDERACIÓN	DESCRIPCIÓN
X = 1	Captación buena. Ocurre cuando todas o casi todas las rocas que caen son retenidas en la cuneta.
X = 2	Captación moderada. Se produce cuando ocasionalmente llegan piedras a la carretera.
X = 3	Captación limitada. Sucede cuando los desprendimientos alcanzan la carretera frecuentemente.
X = 4	Sin captación. Es el caso en el que no existe cuneta o resulta totalmente inefectiva y todas o casi todas las piedras que caen llegan a la carretera.

En el caso de que no se disponga de la información anterior o ésta sea excesivamente subjetiva, es factible estimar de forma objetiva la efectividad o idoneidad de una zanja o cuneta de recepción en función de su geometría y dimensiones siguiendo alguno de estos dos criterios: en el caso de macizos rocosos duros con una resistencia superior a



50 MPa y coeficientes de restitución altos, los valores propuestos por RITCHIE (1963) mediante la tabla recogida en el cuadro VI.3. y en el caso de macizos rocosos medios o blandos, con una resistencia inferior a 50 Mpa, en los que se produce una mayor disipación de energía a lo largo de la trayectoria de caída, se considera más adecuado recurrir a los valores propuestos por CASTAÑEDA (1976) expuestos en el cuadro VI.4 que conducen a dimensiones menos conservadoras.

Cuadro VI.3. Dimensiones idóneas de cunetas para macizos rocosos duros ($R \geq 50$ MPa) para distintas alturas y pendientes del talud .

ALTURA (m)	PENDIENTE DEL TALUD									
	1H:4V / 1H:3V		1H: 2V		3H:4V		1H:1V		5H:4V	
	W	D	W	D	W	D	W	D	W	D
4,5 – 9	3,0	0,9	3,0	0,9	3,0	1,2	3,0	0,9	3,0	0,9
9 - 18	4,5	1,2	4,5	1,2	4,5	1,8	4,5	1,2	3,0	1,5F
18 - 30	6,0	1,2	6,0	1,8F	6,0	1,8F	4,5	1,8F	4,5	1,8F
> 30	6,0	1,2	7,5	1,8F	7,5	2,4F	4,5	1,8F	4,5	1,8F

Cuadro VI.4. Dimensiones idóneas de cunetas en macizos rocosos medios o blandos ($R \leq 50$ MPa) para distintas alturas y pendientes del talud

ALTURA (m)	TALUD		ALTURA (m)	TALUD	
	1H:4V / 2H:3V			2H:3V / 1H:1V	
	W	D		W	D
10 – 25	2,2	1,2	6 - 20	2,2	1,2
25 - 40	3,2	1,6	> 20	3,5	1,8
> 40	3,7	2,0	-	-	-

Siendo:

W : anchura de la cuneta en metros

D: profundidad de la cuneta en metros

F: la zanja puede ser de 1,20 m con una valla complementaria hasta la profundidad total

VI.2.3. Anchura de la vía.

Esta dimensión, medida transversalmente al eje de la vía, representa el margen de maniobra disponible por el usuario para evitar el impacto con un posible desprendimiento de rocas. Esta medida debe ser la anchura mínima cuando el ancho de la vía no es constante en el tramo en el que se analiza el riesgo. Se considerará el ancho del arcén únicamente si éste está pavimentado y en vías con calzadas separadas por sentido de circulación (autopista y autovías), sólo se considera el ancho de la calzada anexa al talud que se está analizando.

Para facilitar la valoración de este parámetro que deberá ser acumulado en el factor de ajuste por peligrosidad se propone utilizar la siguiente expresión matemática:

$$X = \frac{65 - 4,1 \cdot \text{Anchura de la vía (m)}}{10} \tag{VI.5}$$

VI.2.4. Tamaño del bloque o volumen de desprendimientos por evento.

Este parámetro representa la fenomenología del desprendimiento más probable. Si se trata de bloques individuales, la puntuación dependerá del tamaño de éstos. Sin embargo, si se espera la caída de una masa de roca fracturada, el volumen de ésta es lo que se deberá valor. La toma de decisión sobre cuál de las dos situaciones implementar deberá determinarse, siempre que sea posible, a partir del historial de caídas o desprendimientos con que cuente el servicio encargado de la conservación de la vía. Cuando no haya antecedentes disponibles, se estimará a partir de las condiciones observadas en campo y, en caso de duda, se valorarán las dos posibilidades por separado adoptando el valor más desfavorable de ambas situaciones.

Para valorar el efecto del tamaño del bloque se propone utilizar la siguiente expresión:

$$X = \frac{10 \cdot \text{Dimensión del bloque (m)}}{3} \tag{V.6}$$

En el caso de que se necesite ponderar el parámetro en función del volumen del desprendimiento, la expresión a emplear podría ser la siguiente:

$$X = \frac{4 \cdot \text{Volumen (m}^3\text{)}}{10} \tag{VI.7}$$

VI.2.5. Clima y presencia de agua en el talud

El agua y los ciclos de hielo/deshielo contribuyen al desgaste o meteorización y al desprendimiento de materiales rocosos. Si se tiene conocimiento que el agua fluye de forma continua o intermitente por el talud, se podrá ponderar este factor en consecuencia. El impacto del ciclo hielo/deshielo puede interpretarse a partir de las condiciones de congelación y sus efectos en la zona.

Para facilitar la labor del evaluador, se han establecido 4 Zonas Climáticas (ZC_x) a cada una de las cuales se le ha asignado un valor del exponente x : ZC_1 , ZC_2 , ZC_3 y ZC_4 . Dichas zonas se han definido a partir de la información recopilada en los mapas pluviométricos y térmicos de la Guía CLIMCAN en la que se describe la caracterización climática de las Islas Canarias para la aplicación del Código Técnico de la Edificación.

Los criterios a tener en cuenta para la localización del talud en una u otra Zona Climática son los descritos a continuación:

ZC_1 : Taludes o laderas ubicados en áreas de precipitación inferior a 300 mm/año (zona pluviométrica V del CTE). Se caracterizan por una baja a moderada precipitación, sin periodos de heladas sin la presencia de agua en el talud.

ZC_2 : Taludes o laderas localizados en áreas de moderada precipitación entre 300 y 500 mm al año (zona pluviométrica IV del CTE) y ubicados a una cota inferior a los 2.000 m sobre el nivel del mar. Se trata de un ámbito caracterizado por una moderada precipitación y/o con periodos cortos de heladas y/o en los que se detecta una presencia intermitente de agua en el talud.

ZC_3 : Taludes o laderas ubicados en áreas de moderada precipitación a una cota igual o superior a 2.000 m sobre el nivel del mar o taludes o laderas ubicados en áreas de alta precipitación, entre 501 y 1.000 mm al año (zona pluviométrica III del CTE) Este ámbito está caracterizado por una alta precipitación y/o con largos periodos de heladas y/o en los que se detecta una presencia o surgencia continua de agua en el talud.

ZC_4 : Taludes o laderas ubicados en áreas de muy alta precipitación entre 1.001 y 2.000 mm al año (zona pluviométrica II del CTE) Esta zona se caracteriza por una elevada precipitación y largos periodos de heladas o por la presencia continua de agua en el talud y largos periodos de heladas.

En las siguientes figuras se representan los mapas de zonas pluviométricas recogidos en la Guía CLIMCAN.

Figura VI.3. Guía CLIMCAN niveles de precipitación en las islas occidentales.

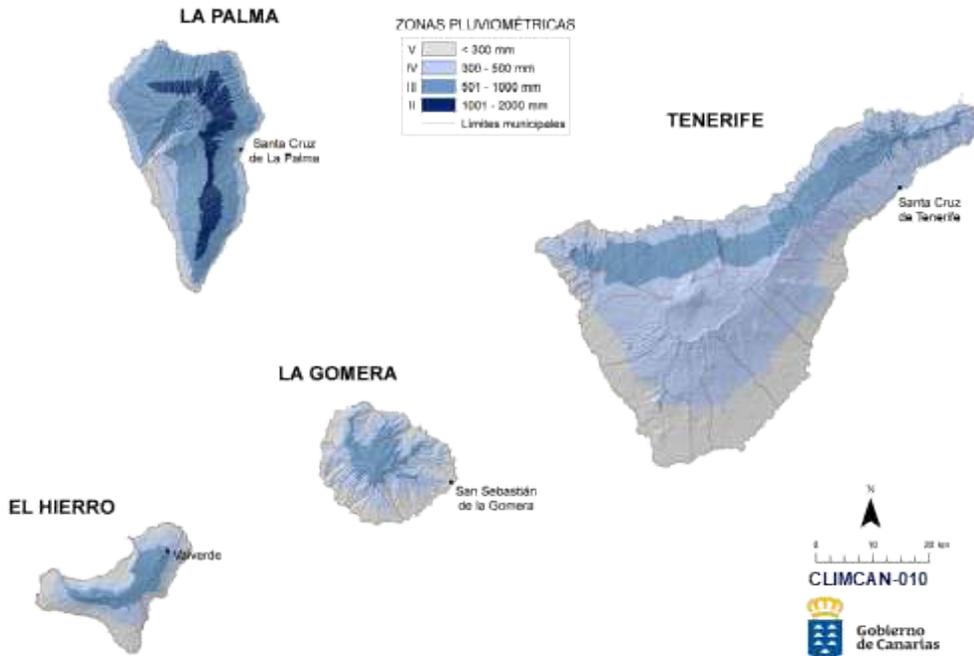
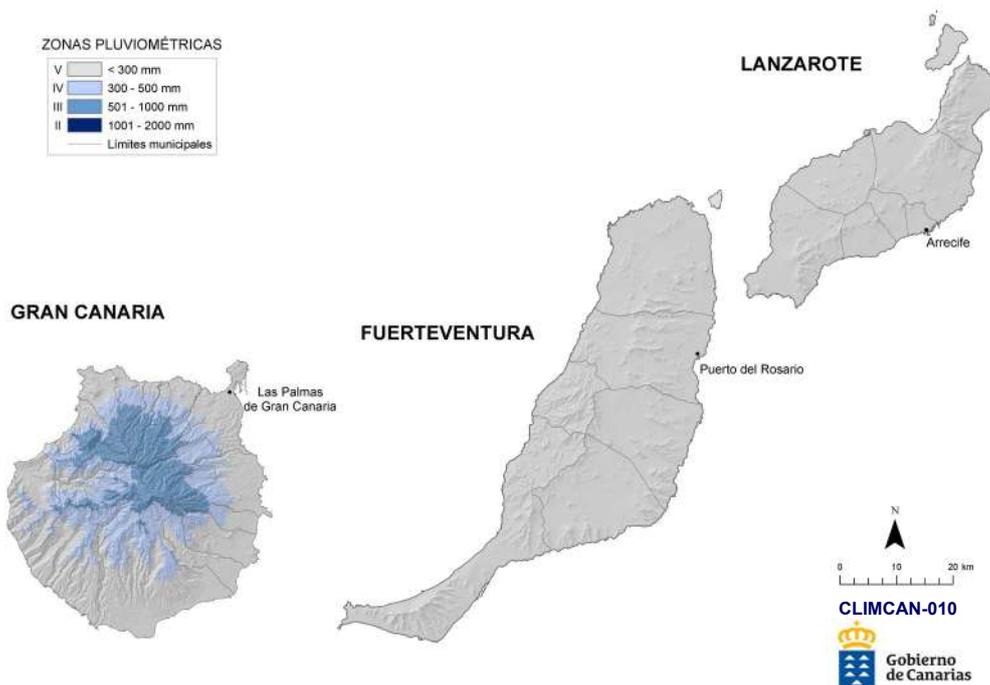


Figura VI.4. Guía CLIMCAN niveles de precipitación en las islas orientales.



VI.2.6. Historial de eventos o caída de bloques.

Mediante este parámetro se trata de tener en cuenta los registros de los desprendimientos ocurridos en el pasado como indicador de los potenciales eventos que pueden producirse en el futuro. Es fundamental disponer, en la medida de lo posible, de dicha información histórica la cual se deberá basar en los informes de los equipos de conservación o mantenimiento de la vía que afecta el talud o ladera en estudio. En zonas de reciente construcción o en las que no se disponga de información o registros documentados de eventos anteriores, se valorará por similitud con otros taludes semejantes indicándose la conveniencia de revisar esta valoración en el futuro conforme se vaya disponiendo de mayor información. Se adjuntan a continuación unas pautas que pueden servir al evaluador para establecer un criterio con el que estimar la puntuación correspondiente a este parámetro.

Cuadro VI.5. Criterio para ponderar el historial de eventos (*Fuente: The Rockfall Hazard Rating System, Lawrence A. Pierson. Oregon Department of Transportation*)

PUNTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
3	Pocos desprendimientos. Han ocurrido desprendimientos varias veces, según la información histórica, pero no han sido un problema persistente. Se producen en pocas ocasiones al año o bajo fuertes tormentas. También se utilizará esta categoría si no existen referencias históricas de desprendimientos.
9	Desprendimientos ocasionales. Ocurren regularmente. Pueden producirse varias veces al año y durante la mayoría de las tormentas.
27	Muchos desprendimientos. Ocurren desprendimientos con frecuencia durante ciertas temporadas, como el invierno o el periodo húmedo de primavera o en el ciclo de hielo / deshielo. Se trata de localizaciones en las que los desprendimientos se producen durante una cierta temporada y no resulta un problema significativo durante el resto del año. Esta categoría también puede utilizarse cuando se han producido grandes desprendimientos.
81	Desprendimientos constantes. Los desprendimientos ocurren frecuentemente a lo largo de todo el año. Esta categoría se utiliza también para sitios donde son comunes los grandes desprendimientos.

VI.3 Ajuste por exposición:

Con este ajuste se valora la probabilidad que tiene un vehículo de ser afectado por el desprendimiento en función del tiempo que tarda en atravesar la zona de riesgo utilizando un parámetro denominado riesgo medio vehicular. En este ajuste también se valora la posibilidad que tiene el conductor del vehículo de observar a tiempo el desprendimiento y de evitar verse afectado por sus efectos o, al menos, minimizarlos.

VI.3.1. Riesgo medio vehicular.

Este parámetro mide el riesgo asociado al porcentaje de tiempo en el que se encuentran vehículos circulando por el tramo de vía susceptible de sufrir desprendimientos. Su valor se puede obtener por medio de la siguiente expresión basada en la longitud del tramo (frente del talud de estudio), la intensidad media diaria de vehículos (IMD) y la velocidad con que atraviesan la zona de riesgo.

$$RMV = \frac{IMD \text{ (veh/día)} \cdot \text{Long talud (km)}}{\text{Límite de velocidad (km/h)} \cdot 24 \text{ (h/día)}} \cdot 100\% \quad (VI.8)$$

Con ella se puede determinar el porcentaje medio de tiempo en que hay vehículos en el tramo analizado. En tramos de vías que soportan una alta IMD o donde la longitud del talud es importante, es previsible que la fórmula devuelva valores superiores al 100 % lo que significa que, en todo momento, más de un vehículo están atravesando el tramo afectado por el riesgo. En esos casos la puntuación asignada debe limitarse a 100.

Finalmente es necesario destacar la importancia que tiene considerar sólo la longitud de talud en la que la caída de bloques suponga un riesgo real ya que si se sobrestima esta longitud puede incrementar injustificadamente la ponderación aplicada al parámetro.

Para valorar la influencia del efecto de este parámetro se recomienda utilizar la siguiente expresión:

$$X = \frac{RMV \text{ (o RMP)}}{25} \quad (VI.9)$$

VI.3.2. Porcentaje de visibilidad frente a la distancia de reacción.

La capacidad de reacción que tiene un conductor frente a un desprendimiento para evitar verse afectado por sus consecuencias depende de dos parámetros que se exponen a continuación: la visibilidad, es decir, la distancia a la cual es capaz de percibir la presencia de un desprendimiento en la carretera y la distancia de parada que deberá ser inferior a la anterior para que el conductor pueda evitar el impacto.

La **visibilidad** o distancia visible (SD) es un parámetro que es necesario determinar sobre el terreno y se define como la distancia a lo largo de un carril que existe entre un obstáculo situado sobre la calzada y la posición de un vehículo que circula hacia dicho obstáculo, en ausencia de vehículos intermedios, en el momento en que puede divisarlo sin que luego desaparezca de su campo visual. El punto de vista del conductor se fija, a efectos del cálculo, a una altura de un metro y diez centímetros (1,10 m) sobre la calzada y a una distancia de un metro y cincuenta centímetros (1,50 m) del borde izquierdo de cada carril, por el interior del mismo y en el sentido de la marcha. La altura del obstáculo sobre la rasante de la calzada se fijará en veinte centímetros (20 cm).

A lo largo de un tramo de vía con posibilidad de desprendimientos la visibilidad o distancia visible puede cambiar de forma apreciable. Las curvas en planta y los cambios de rasante junto con la presencia de afloramientos rocosos o vegetación frondosa que actúan como pantallas visuales, pueden limitar de manera importante la capacidad del conductor para detectar objetos (desprendimientos) sobre la calzada.

Por otro lado, la Norma 3.1-IC Trazado, de la Instrucción de Carreteras (Orden FOM/273/2016, de 19 de Febrero), define la **distancia de parada** como la recorrida por un vehículo obligado a detenerse ante un obstáculo inesperado en su trayectoria (como puede ser un desprendimiento), medida desde su posición en el momento de aparecer el objeto que motiva la detención. Incluye la distancia recorrida durante los tiempos de percepción, reacción y frenado y se estima mediante la siguiente expresión:

$$DP = \frac{v \cdot t_p}{3,6} + \frac{v^2}{254 \cdot (f_r + i)} \quad (VI.10)$$

siendo:

DP: distancia de parada (m)

v : velocidad al inicio de la maniobra de frenado (Km/h). A efectos de cálculo, se considerará la máxima velocidad reglamentaria permitida en dicho tramo.

f_l = coeficiente de rozamiento longitudinal movilizado rueda-pavimento. Se adoptarán los valores recogidos en la Tabla 3.1 de la referida Instrucción de Carreteras que los relaciona con la velocidad.

i = inclinación de la rasante (en tanto por uno).

t_p = tiempo de percepción y reacción (s). A efectos de cálculo, se adoptará el valor de 2 segundos.

En función de que el vehículo circule en rampa o en pendiente, la inclinación de la rasante de la vía provocará que la distancia de parado sea menor o mayor, respectivamente. A continuación se expone un cuadro resumen con el rango de valores obtenidos para distintas velocidades de circulación y distintas rasantes de la carretera:

Cuadro VI.6. Ejemplos de distancias de parada para distintas velocidades y rasantes.

v (km / h)	Distancia de Parada			Rango
	$i = -0,8$	$i = 0,0$	$i = 0,8$	D
40	35	37	40	35 -40
50	48	52	58	48 - 58
60	63	70	79	63 - 79
70	82	91	106	82 - 106
80	103	117	138	103 - 138
90	127	145	176	127 - 176
100	154	179	220	154 - 220
110	185	217	272	185 - 272
120	219	261	335	219 - 335

Se define la Capacidad de Reacción (CR) como la relación entre la distancia de visibilidad y la distancia de parada en tanto por ciento.

La capacidad de reacción será del 100 % cuando la visibilidad o distancia visible sea igual o superior a la distancia de reacción; en caso contrario, el porcentaje se calculará a través de la siguiente expresión:

$$CR = \frac{\text{Visibilidad (SD)}}{\text{Distancia de Parada (DP)}} \cdot 100\% \quad (\text{VI.11})$$

Para ponderar la Capacidad de Reacción del conductor se podrá utilizar la siguiente expresión matemática:

$$X = \frac{120 - CR}{20} \quad (\text{VI.12})$$

VI.4 Aplicación de la clasificación VRHRS:

A continuación, en el cuadro VI.7 se presenta una tabla que facilita el registro de los valores alcanzados en los 8 parámetros o categorías que han de ser evaluados para incorporar el ajuste por peligrosidad y por exposición al grado de estabilidad VRHRS básico.

Para cada uno de los parámetros definidos anteriormente, que aparecen especificados en la primera columna de la tabla, se debe introducir un valor ponderado entre 3 y 81 puntos, realizando una estimación de acuerdo con los criterios explicados, interpolando exponencialmente en caso de que se estimase necesario.

Alternativamente se puede calculando el valor de x mediante las expresiones analíticas que se han propuesto al final de cada apartado anterior para cada uno de los parámetros a analizar. Finalmente se obtendrá su correspondiente valor mediante la expresión:

$$y = 3^x \text{ (siendo } x = 1, 2, 3 \text{ ó } 4\text{)}. \quad (\text{VI.13})$$

Si para algún parámetro el valor obtenido fuese superior a 100, se debe truncar hasta este valor.



Cuadro VI.7. Tabla para la estimación del índice VRHRS.

CALIDAD Y GRADO DE ESTABILIDAD GENERAL DEL MACIZO ROCOSO (VRHRS _{básico})				
VRHRS _{básico}	$200 \cdot e^{-0,034 \cdot VSR}$			100 ≥ VSR ≥ 0
	Puntuación:			
AJUSTE POR PELIGROSIDAD DEL TALUD (F ₁)				
Parámetro	Criterios de valoración y puntuación			
	(x=1) 3 Puntos	(x=2) 9 Puntos	(x=3) 27 Puntos	(x=4) 81 Puntos
Altura del talud	7,5 m	15,0 m	22,5 m	30 m
Efectividad de la cuneta	Buena	Moderada	Limitada	Nula
Anchura de la calzada	13,5 m	11,0 m	8,5 m	6,0 m
Tamaño del bloque o volumen de rocas	0,3 m	0,6 m	0,9 m	1,2 m
	2,5 m ³	5,0 m ³	7,5 m ³	10,0 m ³
Clima y presencia de agua en talud	Zona Climática 1 (ZC ₁)	Zona Climática 2 (ZC ₂)	Zona Climática 3 (ZC ₃)	Zona Climática 4 (ZC ₄)
Historial de eventos	Pocos desprendmtos.	Desprendmtos. ocasionales	Muchos desprendmtos.	Desprendimientos constantes
Puntuación F1:				
AJUSTE POR EXPOSICIÓN (F ₂)				
Parámetro	Criterios de valoración y puntuación			
	(x=1) 3 Puntos	(x=2) 9 Puntos	(x=3) 27 Puntos	(x=4) 81 Puntos
Riesgo medio vehicular	25 %	50 %	75 %	100 %
Capacidad de reacción	100 %	80 %	60 %	> 40 %
Puntuación F2:				
Puntuación final Índice VRHRS				

En función de la puntuación final obtenida para cada uno de los taludes o macizos rocosos estudiados, se recomiendan las siguientes pautas o actuaciones a seguir:

Cuadro VI.8. Recomendaciones en función de la puntuación VRHRS.

CLASE	Puntuación VRHRS	Recomendaciones
A (máximo riesgo)	> 500	Taludes de carretera que requieren de acción inmediata.
B (riesgo medio)	300 - 500	Taludes de carretera que requieren una actuación prioritaria a corto-medio plazo.
C (riesgo moderado)	< 300	Taludes de carretera con baja prioridad de actuación.

Los taludes de clase A presentan un riesgo máximo y deben implementarse sobre ellos medidas que permitan reducir su nivel de riesgo de manera inmediata. En cambio en los taludes del tipo C tan sólo es necesario realizar sobre ellos un seguimiento que permita constatar que no varían negativamente, hacia una mayor inestabilidad, los factores intrínsecos del talud.

Los taludes de clase B son taludes de riesgo medio en los que se recomienda llevar a cabo un seguimiento constante que permita realizar una Evaluación Cuantitativa del Riesgo (QRA Quantitative Risk Assessment) El resultado de esta evaluación determinará la necesidad de tomar medidas más o menos inmediatas en función de la aceptabilidad de la probabilidad de que se produzcan inestabilidades en ese talud y de sus consecuencias en pérdidas humanas.



Anejo VII. Medidas de control y protección.

Para desarrollar la gestión del riesgo de inestabilidades, tratada en el capítulo 6 de esta Guía, es necesario realizar un análisis de alternativas en la que habrá que tener en cuenta los condicionantes de cada caso, ya sean de tipo económico, técnico o medioambiental, para proponer aquellas que cumplan de una manera más satisfactoria todos estos condicionantes y seleccionar aquella que ofrezca un mejor cumplimiento de los criterios de coste-beneficio.

En este anejo se presenta una descripción de las diferentes medidas que son utilizadas habitualmente clasificándolas en dos grupos: medidas de corrección y estabilización de taludes y laderas, que son aquellas que de una forma activa tratan de evitar que se produzca la inestabilidad mediante la consolidación por refuerzo del talud, y medidas de control y protección de caída de rocas, que consisten en evitar que los materiales que se pudieran desprender como consecuencia del desarrollo de una inestabilidad alcancen al elemento que se necesita proteger.

Para ello se ha creado una ficha para cada una de las medidas propuestas en la que se realiza una descripción de la misma, se detallan sus características técnicas y usos y aplicaciones, ventajas e inconvenientes y se dan recomendaciones de uso. También se aporta una relación de normas que deben ser tenidas en cuenta a la hora del diseño o instalación de las soluciones. Estas normas están actualizadas con fecha de abril de 2019, por lo que se recomienda revisar su vigencia a la hora de aplicarlas, así como la revisión de otras normas que puedan ser de aplicación.

VI.1. Medidas de corrección y estabilización de taludes y laderas.

VI.1.1 Modificación de la geometría: Retalzado y excavación de cabecera.

Descripción: Consiste en modificar el talud, mediante retalzado, hasta obtener un perfil adecuado o excavar la cabecera del talud para reducir el peso de la misma.

Características técnicas: El retalzado se puede lograr por excavación o por relleno del talud. En la excavación de cabecera se aligera la parte alta del talud puesto que es la que aporta una mayor fuerza actuante sobre la masa de deslizamiento. Es importante calcular la masa que se extraerá para garantizar la estabilidad del talud y obtener el factor de seguridad requerido en cada caso.

Usos y aplicaciones: En un gran número de casos, particularmente en roturas circulares.

Ventajas: Es muy efectivo, sobre todo en suelos friccionantes. En principio constituye una opción ventajosa por su bajo coste frente a otras opciones, y la posibilidad de trasladar el peso desde la cabecera del talud al pie del mismo, mejorando su estabilidad general.

Inconvenientes: Algunos de los inconvenientes más comunes son la dificultad de acceso para realizar los trabajos de movimiento de tierras, la ripabilidad de los materiales, la disponibilidad de zonas apropiadas para el vertido de materiales y su posible reutilización.



Figura VII.1.1 Retalzado por excavación.

Recomendaciones: La modificación de la geometría del talud debe prever un sistema de drenaje adecuado y evitar la infiltración de aguas pluviales. Para la mejora del coeficiente de seguridad obtenido en función del material movilizado y del análisis comparado con otras medidas se podrán adoptar los criterios técnico-económicos para optimizar las medidas de estabilización más apropiadas.

Normativa aplicable:

Para infraestructuras de carreteras, consultar el PG-3.
Para infraestructuras ferroviarias, consultar las normas de Renfe y Adif.

VI.1 Medidas de corrección y estabilización de taludes y laderas.

VI.1.2 Modificación de la geometría: Tacones de tierra o escollera.

Descripción: Consiste en aumentar el peso al pie del talud, es la modificación que se realiza con más frecuencia en los taludes.

Características técnicas: La base del relleno debe presentar una granulometría adecuada, que garantice el drenaje del mismo.

Usos y aplicaciones: Principalmente para deslizamientos en circulares.

Ventajas: Si se combina con el descabezado del talud, se puede utilizar el material extraído en cabecera para reforzar el pie del talud, lo cual resuelve el problema del vertido de material de extracción. La construcción de tacones al pie del talud aumenta las tensiones normales sobre la superficie de rotura, mejorando la estabilidad al aumentar la resistencia al corte.

Inconvenientes: Requiere disponer de gran cantidad de espacio al pie del talud para la ejecución del tacón.



Figura VII.1.2 Tacón de escollera.

Recomendaciones: Para el drenaje de la base del talud es necesario instalar un material filtrante entre el relleno drenante y el material del talud.

Normativa aplicable:

- UNE-EN 13383-1/AC: 200VI. Escolleras. Parte 1: Especificaciones
- Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera. (Ministerio de Fomento, 2006).
- Recomendaciones para el diseño y construcción de muros de escollera en obras de carreteras. (Ministerio de Fomento, 1998).

4.1 Medidas de corrección y estabilización de taludes y laderas.

4.1.3 Modificación de la geometría: Bermas intermedias.

Descripción: Se trata de escalonar el talud construyendo bancos y bermas que contribuyen a evitar las roturas superficiales que afectan a todo el frente del talud.

Características técnicas: Es conveniente que las alturas del escalón sean grandes y los ángulos de escalonado suficientemente pendientes, para conseguir mayores anchos de berma, con lo que se consigue aumentar la funcionalidad de las mismas, aunque siempre teniendo en cuenta que a mayor ancho de berma, mayor riesgo de aparición de tracciones en la cresta del escalón, lo que da lugar a grietas y desprendimientos. Los anchos de berma suelen oscilar entre los 3 y los 5 metros.

Usos y aplicaciones: Indicadas para taludes de gran altura en roca, sobre todo si es una roca fácilmente meteorizable. Se utilizan también en el caso de roturas poco profundas del terreno.

Ventajas: Facilitan el proceso constructivo y las operaciones de mantenimiento del talud.
Retienen las caídas de rocas y roturas locales del talud.
Facilitan el drenaje.

Inconvenientes: En los ángulos de berma se produce una concentración de tensiones que pueden inducir a una rotura.
Al aumentar la pendiente con respecto al talud general, se puede aumentar la inestabilidad.



Figura VII.1.3 Talud con berma.

Recomendaciones: Tener en cuenta la posibilidad de instalar medidas de control de desprendimientos.

Normativa aplicable:

VI.1 Medidas de corrección y estabilización de taludes y laderas.

VI.1.4 Drenaje superficial.

Descripción: El drenaje superficial tiene por objeto canalizar las aguas de escorrentía, para evitar la erosión de la cara del talud y la infiltración de agua.

Características técnicas: El drenaje superficial se realiza mediante cunetas y zanjas de drenaje que pueden ser transversales o longitudinales e incluso en “espina de pescado” para abarcar mayor superficie.

Usos y aplicaciones: El drenaje superficial debe formar parte de cualquier medida de tratamiento de taludes con problemas de inestabilidad o susceptible de tenerlos. Es un método necesariamente complementario a cualquier otra medida que se tome en el talud.

Ventajas: Las medidas de drenaje disminuyen el agua presente en el talud, por tanto, disminuyen las presiones intersticiales que son un factor decisivo en la desestabilización de superficies de rotura y grietas de tracción. Técnicas poco costosas y fáciles de instalar. El drenaje superficial sirve también para transportar el agua extraída en los drenajes profundos.

Inconvenientes: Si no se realiza una vigilancia activa del estado de los drenes, estos podrían quedar inutilizados por taponamiento del conducto o por derrubios.



Figura VII.1.4 Drenaje superficial.

Recomendaciones: Si existen grietas en la cabecera del talud, conviene además de la instalación de estructuras drenantes, realizar un sellado de las mismas, para evitar las presiones intersticiales que provocarían una rotura. Se debe tener en cuenta que las zonas de cabecera y en las bermas en caso de taludes escalonados, es donde se acumula más agua, por lo que son zonas que deben estar drenadas.

Normativa aplicable:

- D.G. de Publicaciones. Centro de Publicaciones. M° de Fomento (2002). Construcción de explanaciones, drenajes y cimentaciones. PG-3.

VI.1 Medidas de corrección y estabilización de taludes y laderas.

VI.1.5 Drenaje profundo.

Descripción: Mediante el drenaje profundo se extrae el agua ya presente en el macizo rocoso con el fin de abatir el nivel freático.

Características técnicas: Los drenajes profundos se clasifican en:

- Drenes horizontales o californianos, perforados desde la superficie del talud, con un diámetro entre 100 y 150 mm y 30 ó 40 metros de longitud.
- Pozos verticales, perforados desde la superficie del talud o desde una superficie superior al mismo, tienen diámetros que oscilan entre los 30 y los 150 cm.
- Galerías de drenaje, que se realizan paralelas al talud y a bastante profundidad.
- Pantallas drenantes, que consisten en pozos de gran diámetro (1,5-2 metros), unidos entre sí.

Usos y aplicaciones: Taludes susceptibles de saturación de agua o con problemas de filtraciones importantes, que generan inestabilidad por disminución de la resistencia al corte del terreno.

Ventajas: Se consigue drenar zonas profundas, eliminando las presiones intersticiales y aumentando la resistencia al corte.

Inconvenientes: requiere equipos de perforación costosos. Son sistemas complejos de construir y necesitan un mantenimiento permanente.

Recomendaciones: Se debe diseñar siempre en función del caudal a drenar, las características hidrogeológicas de los materiales y el radio de acción del elemento drenante.

Se debe garantizar que las excavaciones o perforaciones alcancen las cotas suficientemente bajas para drenar lo más eficazmente posible el macizo. Debe asegurarse la evacuación de los caudales drenados hasta zonas sin conexión hidráulica con el acuífero.

Es conveniente el uso de geotextiles para evitar la colmatación con finos.

Normativa aplicable:

- **UNE-EN 15237:2011** Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Drenaje vertical.
- D.G. de Publicaciones. Centro de Publicaciones. Mº de Fomento (2002). Construcción de explanaciones, drenajes y cimentaciones. PG-3.
- D.G. de Carreteras. Mº de Fomento (2004). Orden Circular 17/2003: Recomendaciones para el proyecto y construcción del drenaje subterráneo en obras de carretera.

VI.1 Medidas de corrección y estabilización de taludes y laderas.

VI.1.6 Anclajes.

Descripción: Son elementos formados por cables o barras de acero que se anclan a zonas estables del macizo, trabajan a tracción y proporcionan una fuerza contraria al movimiento y un incremento de las tensiones normales sobre la superficie de rotura. Se clasifican en:

- Activos: se tensan tras su instalación hasta su carga admisible.
- Pasivos: comienzan a trabajar al producirse el movimiento del bloque o del terreno.
- Mixtos: se tensan con una carga inferior a la carga admisible.

Características técnicas: Se distinguen tres partes esenciales, una zona de anclaje que se fija al terreno y transmite los esfuerzos, una zona libre que no se fija al terreno que la rodea pudiéndose deformar libremente al ponerse en tensión y la cabeza que es la zona de unión de la armadura con la placa de apoyo sobre la que se ejerce la acción exterior.

Las longitudes de los anclajes pueden ser muy variables, normalmente entre 15 y 40 metros y su capacidad de carga suele oscilar entre 60 y 120 toneladas por anclaje.

Usos y aplicaciones: Se utilizan para el cosido de macizos rocosos fracturados, para sujetar bloques de roca, evitar el deslizamiento de taludes, o el sostenimiento de excavaciones o estructuras de hormigón armado. Los anclajes pueden ser aislados, o se pueden unir sus cabezas mediante elementos rígidos de hormigón o acero.

Ventajas: Es un método muy utilizado para estabilizar macizos rocosos que presentan superficies de rotura profundas.

Inconvenientes: En general tiene un alto coste, dependiendo de los accesos y facilidades para su instalación. Los anclajes permanentes deben ofrecer garantías de durabilidad a largo plazo ya que pueden ser muy vulnerables a la corrosión.



Figura VII.1.5 Anclajes unidos mediante viga de hormigón.

Recomendaciones: La ejecución y las pruebas de carga deben realizarse siguiendo las normativas vigentes y recomendaciones al efecto.

Normativa aplicable:

- UNE-EN 1537:2015. Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Anclajes.
- Centro de Publicaciones. M° de Fomento (2001). Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera.

VI.1 Medidas de corrección y estabilización de taludes y laderas.

VI.1.7 Muros.

Descripción: Los muros se emplean para reforzar la zona de pie del talud colaborando a contener empujes y a protegerlo de los procesos de erosión .

Características técnicas: hay diferentes tipos según los requerimientos que se exijan.

- *De gaviones:* son muros flexibles que trabajan por gravedad y consisten en rellenos granulares de roca no degradable contenidos en una malla de acero que le da al conjunto forma de prisma rectangular.
- *De gravedad:* que consisten en muros de hormigón que trabajan como elementos pasivos, en los que el peso propio es la fuerza estabilizadora.
- *De tierra armada:* que están formados por un paramento exterior prefabricado que puede ser de hormigón o chapas metálicas y un relleno de suelo reforzado mediante bandas o tirantes de material sintético que se enganchan al paramento y al talud.
- *Anclados:* que son muros de hormigón reforzados con anclajes para aumentar la resistencia al vuelco y al deslizamiento de la estructura.

Usos y aplicaciones: Se utilizan como elementos de contención, sostenimiento o revestimiento.

- **Contención:** Requieren excavación al pie del talud, y evitan las deformaciones superficiales del terreno.
- **Sostenimiento:** Se construyen separados del talud y se rellena el trasdós con material estabilizador.
- **Revestimiento:** protegen el terreno de la erosión y meteorización además de añadir un peso estabilizador al talud.



Figura VII.1.6 Muro de gaviones.

Recomendaciones: Es muy importante realizar una instalación de drenaje en el muro ya que excepto los de gaviones, los muros se realizan con materiales impermeables. Para el proyecto del muro es necesario diseñar adecuadamente su cimentación en terreno estable, particularmente en superficies inclinadas.

Ventajas: Los muros de gaviones permiten el drenaje del talud, además, al ser flexibles absorben mejor la energía de los impactos de la caída de rocas.

Los muros de tierra armada pueden utilizar tierra del propio talud.

Inconvenientes: Requieren excavación al pie del talud, lo puede provocar inestabilidades temporales.

Las dimensiones y el grado de anclaje del muro limitan su capacidad estabilizadora. En el caso de roturas profundas los muros no son eficaces.

Se debe proporcionar suficientes elementos de drenaje.

Las mallas que forman los muros de gaviones están expuestas a la corrosión.

Normativa aplicable:

- **UNE-EN13251:2017** Geotextiles y productos relacionados. Características requeridas para su uso en movimientos de tierras, cimentaciones y estructuras de contención.
- **UNE-EN 15258:2009** Productos prefabricados de hormigón. Elementos de muros de contención.
- **UNE 36730:2006** Gaviones y gaviones recubrimiento de enrejado de malla hexagonal de alambre de acero galvanizado o galvanizado y recubierto de PVC.
- **UNE-EN 10223-8:2014** Alambres de acero y productos de alambre para cerramientos y mallas. Parte 8: Gaviones de malla electrosoldada.
- Reglamento de Productos de Construcción (UE) N° 305/2011.



Figura VII.1.7 Muro de tierra armada en construcción.

VI.1 Medidas de corrección y estabilización de taludes y laderas.

VI.1.8 Pantallas de pilotes y micropilotes y columnas de jet-grouting.

Descripción: Se trata de ejecutar alineaciones de estos elementos separados entre sí una distancia tal que se consigue una estructura relativamente continua que atraviesa la zona inestable hasta empotrarse en la parte estable a la que transmiten los esfuerzos.

Características técnicas: La principal diferencia entre pilotes y micropilotes es su diámetro. Los pilotes tienen diámetros comprendidos entre 0,5 y 2 metros y están arriostrados en superficie mediante una viga de hormigón mientras que los micropilotes tienen diámetros menores (aproximadamente 0,12-0,15 m) y sus longitudes alcanzan los 12-20 metros. Van armados con un tubo de acero que se rellena mediante inyección de cemento. Los micropilotes también pueden ser arriostrados, y perforarse con distintas inclinaciones con respecto a la vertical. Las columnas de jet-grouting consisten en perforaciones entre 0,4 y 1 metro de diámetro, que se inyectan con cemento a alta presión a través de un varillaje que gira a gran velocidad, penetrando en el terreno circundante.

Usos y aplicaciones: Son utilizados para el sostenimiento de taludes excavados y como medida estabilizadora de deslizamientos existentes o potenciales. El jet-grouting se utiliza principalmente en suelos granulares.

Ventajas: Pueden instalarse previamente a la excavación para no afectar a la estabilidad del talud durante la construcción y lo protegen frente a otras potenciales inestabilidades. Permiten reducir el espacio empleado para la excavación así como el material extraído.

Inconvenientes: No son efectivos en deslizamientos profundos o de tipo rotacional.



Figura VII.1.8 Micropilotes.

Normativa aplicable:

- UNE-EN 16228-1:2015 Equipos de perforación y cimentación. Seguridad. Parte 1: Requisitos generales.
- UNE-EN 12716:2001 Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Inyecciones de alta presión. Jet grouting.
- UNE-EN 14199:2006 Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Micropilotes.
- UNE-EN 1536:2011+A1:2016 Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Pilotes perforados.
- UNE-EN 12699:2016 Realización de trabajos geotécnicos especiales. Pilotes de desplazamiento.
- CEDEX. Recomendaciones para ejecución del hormigonado de pilotes y pantallas "in situ" R-21.
- CEDEX. Carga de hundimiento por punta de pilotes en rocas. M-71.
- D.G. de Carreteras. Mº de Fomento (2005). Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera.

VI.1 Medidas de corrección y estabilización de taludes y laderas.

VI.1.9 Medidas contra la erosión.

Descripción: Se trata de evitar la erosión superficial del talud utilizando técnicas de recubrimiento superficial como:

- Muros de revestimiento.
- Siembra de diversos tipos, con o sin acolchados.
- Hidrosiembras, tanto de especies herbáceas como leñosas.
- Mantas y redes orgánicas.

Características técnicas: Las hidrosiembras no son adecuadas para grandes pendientes. Por su parte las mallas y mantas orgánicas: retienen las capas superficiales del terreno aportando materia orgánica en su descomposición, favorecen los procesos de enraizamiento y desarrollo de la vegetación. Permiten taludes con mayor pendiente, hasta 45°. El material utilizado para la elaboración de las mallas es el yute y el coco, mientras que para las mantas se utiliza paja, coco y esparto o combinaciones de ellos.

Usos y aplicaciones: Se utilizan para prevenir la erosión superficial y para contribuir a evitar que el agua se infiltre en el talud.

Las mantas son adecuadas para taludes con pendiente y problemas erosivos fuertes. Las mallas o redes se utilizan en taludes con menor pendiente y para estabilizaciones temporales ya que se descomponen más rápido que las mantas.

Ventajas: Provocan un reducido impacto visual o incluso corrigen el impacto de la intervención.

Inconvenientes: Para la siembra se necesitan taludes algo tendidos que puedan retener el agua que necesitan las plantas.



Figura VII.1.9 Manta orgánica.

Recomendaciones: Utilizar especies que se adapten a las condiciones del lugar. La plantación continua de especies herbáceas y pastos suele ser más efectiva que de especies arbóreas.

Normativa aplicable:

- UNE-EN 13253:2017 Geotextiles y productos relacionados. Características requeridas para su uso en obras para el control de la erosión (protección costera y revestimiento de taludes).
- ETA-13/0524 - Hexagonal double twisted wire meshes in rolls and hexagonal double twisted wire meshes with inserted wire ropes.
- UNE-EN 795:2012 Equipos de protección individual contra caídas. Dispositivos de anclaje (Ratificada por AENOR en octubre de 2012.)

VI.2 Medidas de control y protección contra caída de rocas.

VI.2.1 Activas o de estabilización: Eliminación de bloques y saneo.

Descripción: Consiste en la retirada de bloques inestables presentes en la superficie del talud o su cabecera, siempre que sean accesibles y cuyo volumen no sea excesivo, en cuyo caso deben plantearse otras alternativas como la fijación *in situ*. Esta medida se suele tomar como paso inicial a la hora de estabilizar una ladera o talud.

Características técnicas: El saneo se puede realizar con medios mecánicos si las zonas a tratar son accesibles o manualmente si no lo son. Para retirar los bloques manualmente es necesario que un equipo especializado en trabajos verticales escale el talud para detectar los bloques o fragmentos de roca inestables y provocar su caída.

Usos y aplicaciones: Para evitar la caída de bloques aislados que estén accesibles o en zonas cercanas a paseos, bloques de grandes dimensiones que sobresalen del talud.

Ventajas: Es una medida poco costosa que elimina eficazmente bloques o fragmentos antes de que caigan y antes de la colocación de otras medidas, evitando que estos bloques causen daños o disminuyan la eficacia de las medidas adoptadas.

Inconvenientes: En el caso de taludes o laderas bajo los cuales hay tránsito de personas o coches, se necesita cortar el acceso para evitar daños. Puede provocar el deterioro de la superficie al pie del talud, si no se realiza el saneo con cuidado. Se debe evitar que la caída de grandes bloques produzca daños en la superficie de la carretera.



Figura VII.2.1 Saneo de rocas tras un desprendimiento.

Recomendaciones: Requiere inspección frecuente de los tramos potencialmente peligrosos para retirarlos de forma controlada antes de que caigan por sí mismos. Se debe estudiar qué bloques eliminar para evitar desestabilizar otros estables hasta el momento.

Normativa aplicable:

-UNE-EN 795:2012 Equipos de protección individual contra caídas. Dispositivos de anclaje (Ratificada por AENOR en octubre de 2012.)

VI.2 Medidas de control y protección contra caída de rocas.

VI.2.2 Medidas activas o de estabilización: Voladuras.

Descripción: Consiste en introducir barrenos en perforaciones hechas en la roca para fragmentar el material rocoso y facilitar su extracción.

Características técnicas: Hay diferentes técnicas de voladura:

- *Voladura precorte:* se trata de provocar una superficie de discontinuidad en el terreno, coincidiendo con el ángulo de talud predefinido, previamente a la voladura del mismo. Es el tipo de voladura más utilizado porque previene la abertura de discontinuidades y la fisuración de la roca.
- *Voladura por barrenos con entalladura:* se realizan aberturas a lo largo del barreno para dirigir la fracturación aprovechando la concentración de las tensiones en los extremos de las entalladuras. Con esta técnica se reduce considerablemente el consumo de explosivo.
- *Voladura por cargas entubadas con aristas abiertas:* los explosivos se alojan en el interior de tubos metálicos con hendiduras laterales. El tubo concentra las tensiones en un lugar específico y protege el resto de la caña del barreno.

Usos y aplicaciones: Se utiliza para corregir la geometría del talud, o para facilitar y agilizar la eliminación de grandes bloques desprendidos que hayan provocado por ejemplo un corte de carretera.

Ventajas: Es un método rápido y eficaz que permite realizar un corte de rocas para dejar un talud de un solo plano aún cuando hay rocas duras que no se pueden cortar con ripper o retroexcavadora. Permite diseñar taludes más estables, ya que reduce el volumen de roca suelta colgada, con lo que se puede prescindir de bermas, bulones u otros tipos de soportes y acciones sobre el talud.

Inconvenientes: Pueden provocar inestabilidades con el paso del tiempo debido a la fisuración que se produce en la roca y que aumente la abertura de discontinuidades ya existentes.

Recomendaciones: Después de la retirada de bloques por voladura es conveniente realizar una limpieza y saneo para retirar los fragmentos de roca derivados de la explosión.

Estudiar posibles inestabilidades provocadas por la propia voladura.

Normativa aplicable:

- UNE-EN 13630-1:2004 Explosivos para uso civil. Cordones detonantes y mechas de seguridad. Parte 1: Requisitos.
- UNE-EN 13763-1:2004 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 1: Requisitos.
- UNE-EN 13631-1:2006 Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Parte 1: Requisitos.
- UNE 22381:1993 Control de vibraciones producidas por voladuras.
- UNE-EN 13857-1:200VI. Explosivos para uso civil. Parte 1. Terminología.
- UNE-EN 13857-3:2003. Explosivos para uso civil. Parte 3. Información a suministrar por el fabricante o su representante autorizado al usuario.

VI.2 Medidas de control y protección contra caída de rocas.

VI.2.3 Medidas activas o de estabilización: Bulonado.

Descripción: Los bulones son sistemas para anclar de manera permanente la roca al talud. Se pueden considerar anclajes pasivos de baja capacidad. Se instalan en el terreno introducidos en perforaciones rellenas con resina o mortero. El sostenimiento de la inestabilidad se consigue por medio de una placa roscada en el extremo exterior de la barra que se aprieta contra la roca.

Características técnicas: Tienen longitudes que oscilan entre los 3 y los 8 metros y diámetros que van de los 20 a los 40 mm. La carga admisible de estos bulones está entre 5 y 15 toneladas por bulón.

Usos y aplicaciones: Se utiliza en situaciones de riesgo elevado, como es la caída de bloques ya sea por vuelco o por erosión superficial. Se emplean con objeto de minimizar los desprendimientos por rotura a lo largo de fisuras superficiales.

Ventajas: Permiten anclar rocas que no se pueden retirar mediante saneo debido a sus dimensiones.

Inconvenientes: Menos efectivos en suelos o rocas blandas. Vida útil limitada por los efectos de la corrosión. La ejecución de los trabajos se complica cuando la zona a tratar es de difícil acceso.



Figura VII.2.2 Bulón.

Recomendaciones: Realizar un buen levantamiento geomecánico del talud para verificar el espesor del bloque o zona a tratar y la estabilidad del macizo que ha de soportar el anclaje del bulón, de manera que los bulones tengan las dimensiones adecuadas en cuanto a longitud y diámetro

Normativa aplicable:

- UNE 22781:1985 Bulonado. Bulones de anclaje puntual.
- UNE-EN 795:2012 Equipos de protección individual contra caídas. Dispositivos de anclaje (Ratificada por AENOR en octubre de 2012.)

VI.2 Medidas de control y protección contra caída de rocas.

VI.2.4 Medidas activas o de estabilización: Atado de bloques.

Descripción: Consiste en fijar un bloque de roca determinado al talud mediante una red de cable y bulones. La red de cable consiste en una malla metálica de mayores prestaciones que la malla de triple torsión.

Características técnicas: La red se compone de cables de acero galvanizado trenzado, que forman un paño de rombos interiores, cuyos vértices están fijados por medio de grapas metálicas antideslizantes.

Usos y aplicaciones: Se utiliza para retener bloques inestables apoyados sobre el talud que debido a su volumen no se aconseja su retirada mediante saneo.

Ventajas: Permite inmovilizar *in situ* bloques de roca inestables.

Inconvenientes: La dificultad de acceso puede condicionar esta solución.

Recomendaciones: Se requiere una inspección detallada con toma de datos geomecánicos del macizo para determinar la efectividad de los bulones y el dimensionado adecuado de la red de cable.



Figura VII.2.3 Atado de bloques.

Normativa aplicable:

- UNE 22781:1985 Bulonado. Bulones de anclaje puntual.
- UNE-EN 10223-3:2014 Alambres de acero y productos de alambre para cerramientos y mallas. Parte 3: Malla hexagonal de acero para aplicaciones en ingeniería civil.
- UNE-EN 12385-1:2003+A1:2008 Cables de acero. Seguridad. Parte 1: Requisitos generales.
- UNE-EN 12385-2:2004+A1:2008 Cables de acero. Seguridad. Parte 2: Definiciones, designación y clasificación.
- UNE-EN 12385-3:2005+A1:2008 Cables de acero. Seguridad. Parte 3: Información para la utilización y el mantenimiento.
- UNE-EN 795:2012 Equipos de protección individual contra caídas. Dispositivos de anclaje (Ratificada por AENOR en octubre de 2012.)

VI.2 Medidas de control y protección contra caída de rocas.

VI.2.5 Medidas activas o de estabilización: Sistema mixto de cables y malla.

Descripción: Consiste en una malla metálica de triple torsión adosada al terreno que se refuerza y se sujeta al talud con una red cable de acero anclada a la roca con bulones.
Su objetivo es evitar el movimiento de los fragmentos de rocas.

Características técnicas: Es una protección activa adosada a la superficie del terreno de forma que el contacto de la malla con el talud sea el mayor posible.

Usos y aplicaciones: Se utiliza en taludes inestables con riesgo de caída de bloques de manera generalizada.

Ventajas: Evita fijar bloques individuales.
Es un sistema económico y de instalación fácil y rápida.

Inconvenientes: No es apto para grandes bloques.
Requiere personal especializado para la instalación cuando se trate de zonas muy heterogéneas con zonas de mayor inestabilidad.
Si el cosido es deficiente la malla puede abrirse y pierde su funcionalidad.

Recomendaciones: Se debe realizar un estudio geomecánico de la ladera o talud para dimensionar los bulones y la red de malla. Se debe fijar adecuadamente la malla a la ladera.



Figura VII.2.4 Sistema mixto de cables y malla.

Normativa aplicable:

- UNE 22781:1985 Bulonado. Bulones de anclaje puntual.
- UNE-EN 10223-3:2014 Alambres de acero y productos de alambre para cerramientos. Parte 3: Malla hexagonal de acero para aplicaciones en ing civil.
- UNE-EN 10223-4:2013 Alambres de acero y productos de alambre para cerramientos y mallas. Parte 4: Malla electrosoldada.
- UNE-EN 10223-5:2013 Alambres de acero y productos de alambre para cerramientos y mallas. Parte 5: Malla anudada.
- UNE-EN 10218-2:2012 Alambres y productos trefilados de acero. Generalidades. Parte 2: Medidas y tolerancias de los alambres.
- UNE-EN 12385-1:2003+A1:2008 Cables de acero. Seguridad. Parte 1: Requisitos generales.
- UNE-EN 12385-3:2005+A1:2008 Cables de acero. Seguridad. Parte 3: Información para la utilización y el mantenimiento.
- ETA-13/0524 - Hexagonal double twisted wire meshes in rolls and hexagonal double twisted wire meshes with inserted wire ropes.

VI.2 Medidas de control y protección contra caída de rocas.

VI.2.6 Medidas activas o de estabilización: Hormigón proyectado.

Descripción: Consiste en la aplicación de una o varias capas de hormigón proyectado neumáticamente sobre la superficie del talud con el fin de evitar la degradación y alteración de su superficie rocosa, rellenar grietas y contener pequeñas inestabilidades

Cuando se requiere dotar a la solución de resistencia a la tracción, se instalan complementariamente, sobre la superficie del talud, mallas electrosoldadas o bien se añaden a la mezcla grapas de acero o fibras de vidrio.

Características técnicas: El hormigón se debe dosificar con una granulometría con un diámetro inferior a 25 mm. Cuando el tamaño máximo del árido se limita por debajo de los 8 mm, el producto se denomina gunita. En ambos casos, la granulometría debe ser continua.

El agua se mezcla con el árido y el cemento en la boquilla de la pistola o cañón de proyección. La relación agua-cemento de la mezcla debe estar entre 0,38 y 0,40, pues con una menor relación parte del cemento no llega a hidratarse y se genera una importante cantidad de polvo al proyectarlo y con una relación mayor de la indicada, disminuye la adherencia a la superficie. También suele ser conveniente añadir aditivos a la mezcla como puede ser un acelerante del fraguado.

Usos y aplicaciones: Esta técnica se utiliza para reducir la degradación, alteración o erosión de la superficie del talud y para evitar desprendimientos de alcance local y superficial.



Figura VII.2.5 Hormigón proyectado con pigmentos de coloración.

Ventajas: Es una técnica de fácil aplicación y si se ejecuta bien es una solución fiable y duradera.

Inconvenientes: Produce un fuerte impacto visual, aunque actualmente hay pigmentos que ayudan a mimetizar el hormigón proyectado con su entorno.

La mala ejecución o inadecuada decisión sobre el uso de esta medida hace que en algunos casos pierda su eficacia a corto plazo.

Recomendaciones: Para garantizar la adherencia se debe limpiar y sanear la superficie del talud. Es necesario controlar el proceso de ejecución asegurándose la correcta instalación, espesor, cubrimiento completo de la superficie a tratar, etc. ya que de lo contrario podrán darse despegues en los paños de gunitado.

La presencia de materiales arcillosos puede desaconsejar el uso de hormigón proyectado o gunita debido a problemas de adherencia.

Es necesario realizar mechinales de drenaje a lo largo de la superficie del talud, particularmente al pie del mismo.



Figura VII.2.6 Hormigón proyectado sin pigmentos de coloración.

Normativa aplicable:

- UNE-EN 934-5:2009 Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 5: Aditivos para hormigón proyectado. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado.
- UNE 83601:2013 Hormigón proyectado. Determinación del tiempo de fraguado.
- UNE-EN 14487-1:2008 Hormigón proyectado. Parte 1: Definiciones, especificaciones y conformidad.
- UNE-EN 14487-2:2008 Hormigón proyectado. Parte 2: Ejecución.
- UNE 83607:2014 IN Hormigón proyectado. Recomendaciones de utilización.

VI.2 Medidas de control y protección contra caída de rocas.

VI.2.7 Medidas pasivas o de protección: Mallas de guiado.

Descripción: Son mallas de alambre de acero que se tienden desde la cabecera de la ladera hasta el pie, cubriendo toda su superficie con el fin de controlar la caída de fragmentos de roca y evitar que reboten y adquieran energía para recogerlos en la base donde pueden ser fácilmente retirados.

Características técnicas: Se fijan siempre en la parte superior del talud o ladera ya sea ancladas al terreno mediante bulones o en voladizo y se mantienen separadas de la superficie para permitir que los fragmentos desprendidos caigan a la parte inferior, que termina 0,5-1 metro por encima del pie del talud para facilitar su mantenimiento. Para facilitar la recogida se pueden ejecutar al pie de talud cunetones, pantallas o unas bolsas de captación conocidas como “drape bags”.

Usos y aplicaciones: Indicadas para taludes de alta pendiente o muy extensos ya sea vertical u horizontalmente, en los que se producen desprendimientos de bloques menores que son guiados hasta el pie del talud, donde pueden ser recogidos.

Ventajas: Es adecuado para controlar pequeños fragmentos de roca inestables. La instalación es fácil y su coste es bajo.

Inconvenientes: Esta técnica no es adecuada para inestabilidades que afectan a bloques de tamaño medio o alto o a grandes volúmenes. En condiciones de mala accesibilidad los costes pueden ser importantes.

Recomendaciones: Construir, siempre que sea factible, una banqueta o cunetón de tierras como elemento de contención que facilite su mantenimiento. Las mallas hexagonales de triple torsión son las más resistentes y las más recomendables.



Figura VII.2.7 Malla de guiado.

Normativa aplicable:

- UNE 22781:1985 Bulonado. Bulones de anclaje puntual.
- UNE-EN 10223-3:2014 Alambres de acero y productos de alambre para cerramientos y mallas. Parte 3: Malla hexagonal de acero para aplicaciones en ingeniería civil.
- UNE-EN 10223-4:2013 Alambres de acero y productos de alambre para cerramientos y mallas. Parte 4: Malla electrosoldada.
- UNE-EN 10223-5:2013 Alambres de acero y productos de alambre para cerramientos y mallas. Parte 5: Malla anudada.
- UNE-EN 10218-2:2012 Alambres y productos trefilados de acero. Generalidades. Parte 2: Medidas y tolerancias de los alambres.
- UNE-EN 12385-1:2003+A1:2008 Cables de acero. Seguridad. Parte 1: Requisitos generales.
- ETA-13/0524 - Hexagonal double twisted wire meshes in rolls and hexagonal double twisted wire meshes with inserted wire rones.

VI.2 Medidas de control y protección contra caída de rocas.

VI.2.8 Medidas pasivas o de protección: Cunetones.

Descripción: Consiste en realizar una zanja o un cunetón al pie del talud, cuyo objetivo es detener la caída de fragmentos de roca procedentes del talud.

Características técnicas: Sus dimensiones dependerán del tamaño de las rocas o fragmentos a contener. En el fondo de la zanja se coloca una capa de material granular el fin de amortiguar la energía de caída de rocas evitando su rebote. En caso necesario se puede instalar una barrera o pantalla que impida que las rocas caídas sobrepasen el cunetón.

Es un buen complemento de las mallas guiadas.

Usos y aplicaciones: Taludes en roca fragmentada inestable, en el que no se puede evitar la caída de fragmentos rocosos con otras medidas.

Como complemento a las mallas de guiado.

Se utiliza también para recoger el material desprendido en roturas planas, cuñas y vuelcos.

Ventajas: En taludes en zona de tránsito se evita que las rocas o fragmentos que se desprenden caigan a la vía.

Inconvenientes: No es adecuado en taludes que favorecen el rebote de las rocas o de sus fragmentos porque exigiría disponer de una gran superficie libre a pie de talud.

En determinadas condiciones esta medida puede provocar un aumento de la inestabilidad al pie del talud.

Es necesario realizar un mantenimiento periódico para evitar que se colmate.

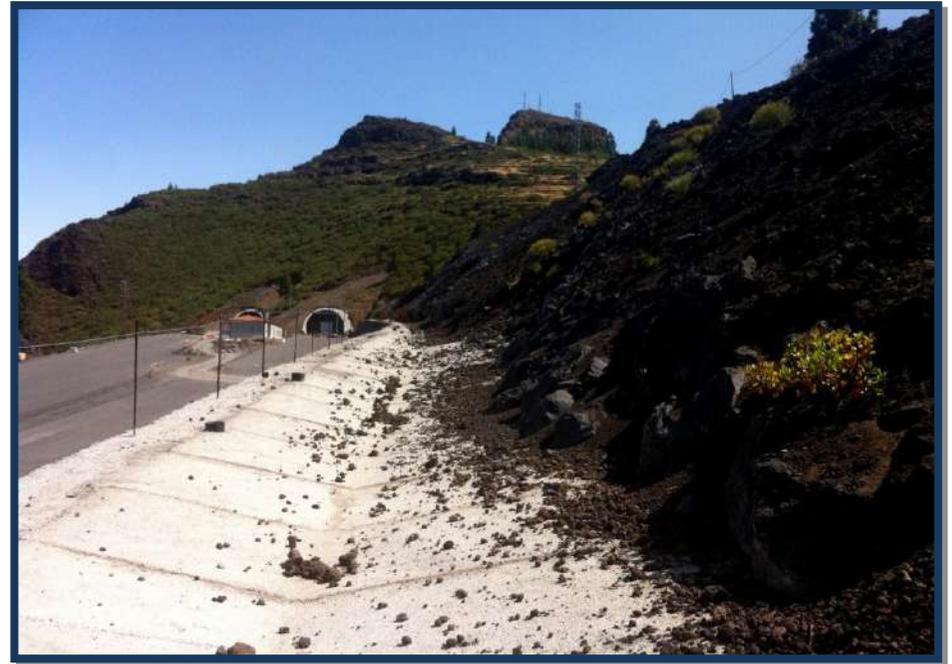


Figura VII.2.8 Cunetón.

Recomendaciones: Se debe realizar un estudio de las posibles trayectorias de los elementos que susceptibles de desprendimiento, a fin de realizar un correcto dimensionado del cunetón.

Normativa aplicable:

Para infraestructuras de carreteras, consultar el PG-3.

Para infraestructuras ferroviarias, consultar las normas de Renfe y Adif.

VI.2 Medidas de control y protección contra caída de rocas.

VI.2.9 Medidas pasivas o de protección: Muros de contención.

Descripción: Muros de hormigón que se construyen tanto al pie como en cualquier tramo de la ladera o talud de excavación en roca donde sean necesarios. Retienen rocas que no deben ser removidas, porque podrían causar mayores inestabilidades.

Características técnicas: Se construyen de hormigón *in situ* o con hormigón proyectado reforzado con mallas de acero en varias capas. Se pueden fijar al terreno mediante anclajes. Como el resto de muros y estructuras impermeables, es necesario instalar un sistema de drenaje para dar salida al agua del trasdós.

Usos y aplicaciones: Para estabilizar o prevenir zonas inestables o con deslizamientos de escasa profundidad, o como medida complementaria a otras.

Ventajas: En determinadas condiciones pueden resultar más económicas frente a otras medidas. Permiten proporcionar una elevada rigidez en el pie de los taludes cuando así lo requieran sus condiciones de estabilidad. Ofrecen un frente de protección continuo a lo largo del pie del talud frente a empujes laterales, siempre que estos no excedan la resistencia del muro o bien la inestabilidad se sitúe por debajo de su pie.

Inconvenientes: Su diseño debe ser efectivo frente a los empujes activos y pasivos y de presiones intersticiales. La cimentación debe proporcionar estabilidad suficiente frente al deslizamiento y vuelco.



Figura VII.2.9 Muro de contención.

Recomendaciones: Se debe asegurar que la estructura contenga la superficie de deslizamiento. Las medidas de drenaje del talud o ladera son fundamentales y deberán ser diseñadas en condiciones adecuadas a las previsibles a largo plazo.

Normativa aplicable:

- UNE-EN13251:2017 Geotextiles y productos relacionados. Características requeridas para su uso en movimientos de tierras, cimentaciones y estructuras de contención.
- UNE-EN 15258:2009 Productos prefabricados de hormigón. Elementos de muros de contención.

VI.2 Medidas de control y protección contra caída de rocas.

VI.2.10 Medidas pasivas o de protección: Barreras o pantallas de protección.

Descripción: Están compuestas por elementos rígidos con los que se pretende interceptar rocas o fragmentos de ellas que puedan desprenderse del talud o ladera y se basan en la robustez o inercia de sus componentes.

Características técnicas: Resisten bajas energías, en general hasta 70 kJ. Están formadas por elementos metálicos como las mallas de acero electrosoldadas o de alambre trenzado. Los postes rígidos pueden estar formados por perfiles de acero que se empotran en muros, bases de hormigón o directamente al terreno.

Usos y aplicaciones: Se utilizan para retener bloques pequeños o medianos y con baja energía de impacto.

Ventajas: Son más económicas que las pantallas dinámicas, tanto el material como la instalación, que además es rápida.

Inconvenientes: Los postes son vulnerables a impactos importantes debido a su rigidez. Uso limitado a desprendimientos menores, es decir, de baja energía y tamaño pequeño de bloques.

Recomendaciones: Limitación de uso por la capacidad de absorción de energía de impacto y altura. Requiere un estudio de las trayectorias de los elementos que deba contener, así como la altura de rebote.

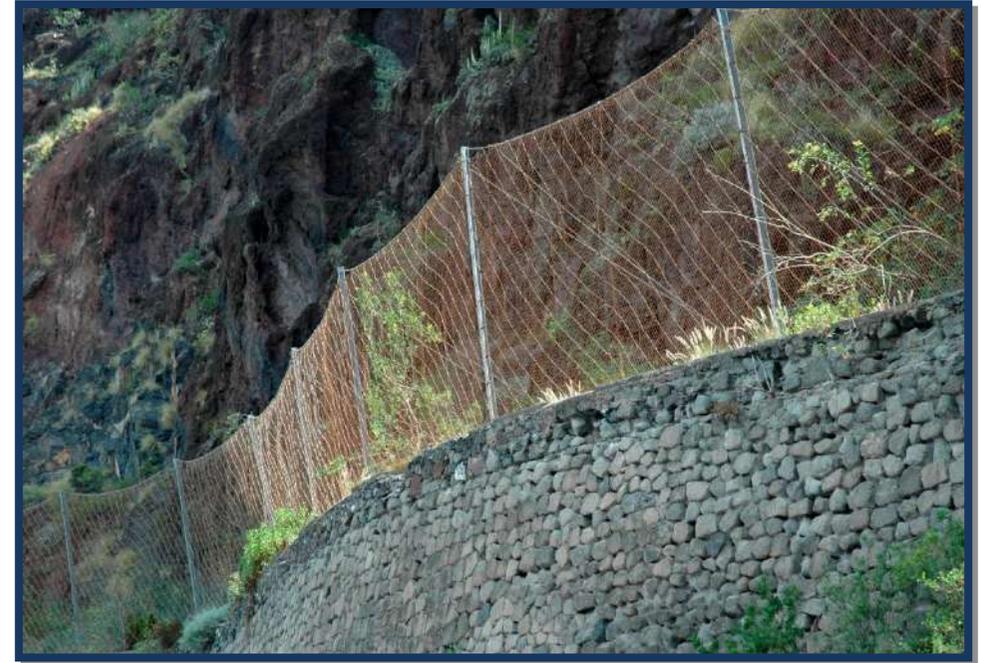


Figura VII.2.10 Pantallas de protección.

Normativa aplicable:

- UNE-EN 10223-3:2014 Alambres de acero y productos de alambre para cerramientos y mallas. Parte 3: Malla hexagonal de acero para aplicaciones en ingeniería civil.
- UNE-EN 10223-4:2013 Alambres de acero y productos de alambre para cerramientos y mallas. Parte 4: Malla electrosoldada.
- UNE-EN 10223-5:2013 Alambres de acero y productos de alambre para cerramientos y mallas. Parte 5: Malla anudada.
- UNE-EN 10034:1994 Perfiles I y H de acero estructural. Tolerancias dimensionales y de forma. (Versión oficial EN 10034:1993).

VI.2 Medidas de control y protección contra caída de rocas.

VI.2.11 Pasivas o de protección: Pantallas o barreras dinámicas.

Descripción: Se instalan perpendicularmente al eje de la trayectoria probable de las rocas, con el objeto de interceptarlas y retenerlas.

La pantalla dinámica es un sistema flexible que se opone a la fuerza de la masa de la roca desprendida que cae en el momento del impacto, absorbiendo gran cantidad de su energía cinética mediante la deformación de sus elementos.

Están compuestas por postes metálicos articulados en su base y disipadores de energía. En su base disponen de un elemento de cierre formado por una red de cables de elevada capacidad de deformación. La transmisión de las fuerzas de reacción a los demás elementos se realiza mediante dos cables longitudinales, uno en la parte superior del poste y otro cerca de la base.

Hay dos clases de barreras dinámicas según el tipo de deformación: elástica y elasto-plástica. La diferencia entre ellas radica en el disipador de energía, muelles elastómeros en las primeras y de fricción o por cortante en las segundas.

Características técnicas: La capacidad nominal de absorción de energía varía según el tipo de pantalla, siendo las elásticas apropiadas para bajas energías y las elasto-plásticas más indicadas para absorber energías altas.

Usos y aplicaciones: Retención de bloques desprendidos en algún punto de su trayectoria, para evitar que lleguen al pie del talud.

Ventajas: Se pueden instalar en cualquier punto de la trayectoria de los posibles elementos desprendidos reteniendo elementos que no se pueden estabilizar *in situ* por encontrarse en zonas de difícil acceso.

Inconvenientes: Es una medida en general de alto coste.



Figura VII.2.11 Pantalla dinámica.

Recomendaciones: Requiere un estudio de las trayectorias de posibles desprendimientos, cálculo de las energías de impacto y alturas de rebote, así como un análisis que determine las posibles áreas fuentes.

Normativa aplicable:

- UNE-EN 10034:1994 Perfiles I y H de acero estructural. Tolerancias dimensionales y de forma. (Versión oficial EN 10034:1993).
- ETAG 027 Guideline for European technical approval of falling rock protection kits.
- Guideline for the approval of rock protection kits. FOEN (Suiza).

VI.2 Medidas de control y protección contra caída de rocas.

VI.2.12 Medidas pasivas o de protección: Muros pantalla.

Descripción: Se trata de muros de hormigón armado construidos *in situ* cuya cimentación se realiza mediante zanjas excavadas en el terreno por debajo de la superficie de rotura, por lo que confiere gran estabilización al talud, similar a las pantallas de pilotes, con la diferencia de que el muro es un elemento continuo y reparte mejor los esfuerzos.

Características técnicas: El muro puede alcanzar una profundidad de 40 metros, dependiendo de la maquinaria de excavación. Se debe contar con un estrato inferior estable y resistente. Para evitar problemas de estabilidad durante la construcción, la excavación se realiza por paños de entre 3 y 6 metros de longitud y el ancho de la zanja está entre 0,45 y 1 metro.

Usos y aplicaciones: Para terrenos en los que la superficie de rotura se encuentra a grandes profundidades y el material es fácilmente excavable.

Ventajas: La cimentación por debajo de la superficie de rotura garantiza la estabilidad del conjunto y evita el vuelco del muro por empuje del terreno..

Inconvenientes: En terrenos con estratos muy duros o rocosos se necesitan medios de excavación costosos. La excavación de la zanja puede provocar inestabilidades durante la construcción.



Figura VII.2.12 Muro pantalla.

Recomendaciones: En casos de sustratos inferiores muy duros es más recomendable la construcción de una pantalla de pilotes.

Normativa aplicable:

-UNE-EN 1538:2011+A12016 Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Muros-pantalla.

VI.2 Medidas de control y protección contra caída de rocas.

VI.2.13 Medidas pasivas o de protección: Falsos túneles.

Descripción: Se trata de estructuras de hormigón que se construyen a modo de túnel para proteger carreteras u otras vías de los desprendimientos de roca o avalanchas.

Características técnicas: La estructura, de hormigón armado, debe ser diseñada para resistir la caída de rocas de acuerdo con el análisis de desprendimientos. En la parte superior se dispone un “colchón de impacto” formado por material granular, con el fin de disipar la energía de choque y evitar el rebote. El apoyo de la parte interna de la estructura se realiza sobre el talud, sin embargo, la parte externa puede conllevar cimentaciones complejas debido a la pendiente del terreno.

Usos y aplicaciones: De aplicación en condiciones específicas de emplazamiento topográfico y donde se prevean importantes y frecuentes caídas de rocas.

Ventajas: Ofrecen buena protección de las vías, siendo una protección muy segura y duradera.

Inconvenientes: Es una solución de alto coste. En taludes con alta pendiente la cimentación de lado externo puede ser muy compleja.

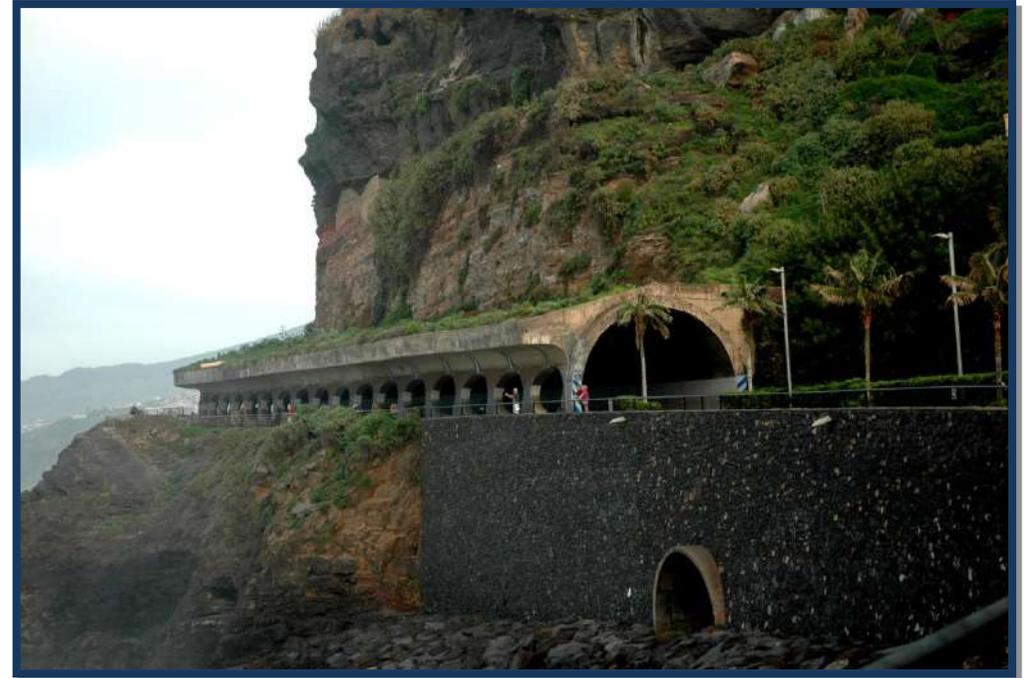


Figura VII.2.13 Falso túnel.

Recomendaciones: Es necesario realizar un análisis coste-beneficio con respecto a otras posibles soluciones, antes de decidir su implantación.

Normativa aplicable:

-UNE-EN 13491:2013 Barreras geosintéticas. Requisitos para su utilización como membranas de impermeabilización frente a fluidos en la construcción de túneles y estructuras subterráneas.

VI.2 Medidas de control y protección contra caída de rocas.

VI.2.14 Medidas pasivas o de protección: Voladizos y galerías dinámicas.

Descripción: Son barreras dinámicas colocadas horizontalmente a modo de pórtico para proteger una vía de la caída libre de bloques.

Características técnicas: Tienen las mismas características que las barreras dinámicas verticales, pero carecen del sistema de protección de golpes en la unión articulada entre el poste y la base. Además se les añade una sujeción de seguridad consistente en un cable de acero que soporta el extremo del poste a la base en caso de fallo en la unión debido al impacto de una roca.

Usos y aplicaciones: Recomendables en taludes muy pendientes y de difícil instalación de otras medidas.

Ventajas: Proporciona una cubierta continua frente a la caída de rocas. Tiene menor impacto visual frente a estructuras de hormigón. Es de fácil instalación y mantenimiento, y puede ser reforzada.

Inconvenientes: Su eficacia depende de la energía de impacto para la que este diseñada. Precisa mantenimiento y recogida de rocas caídas.

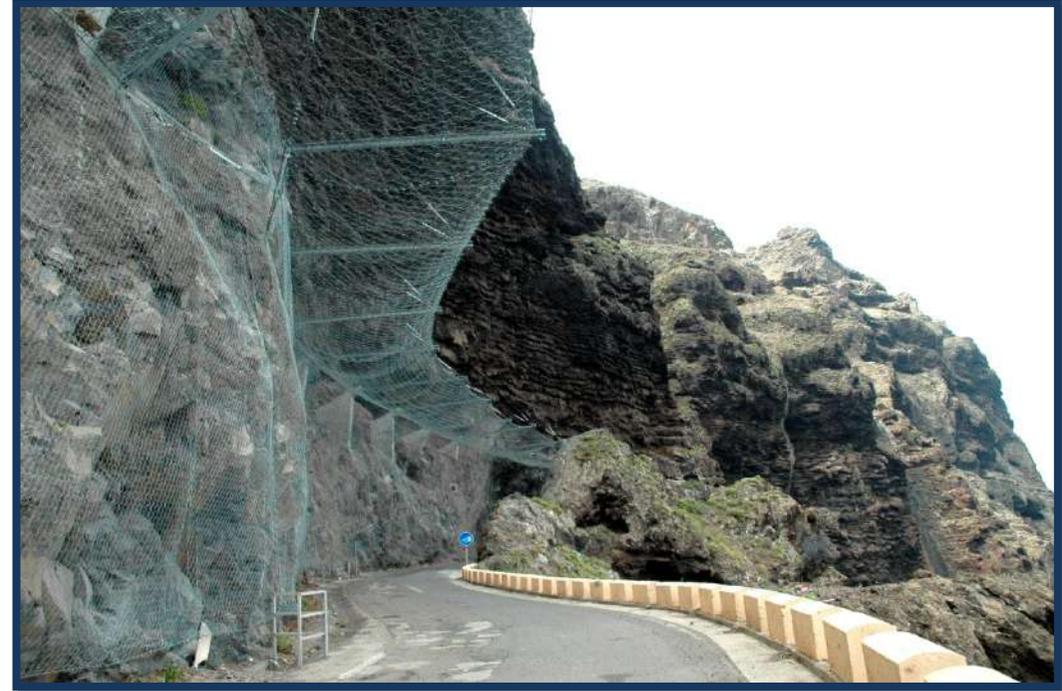


Figura VII.2.14 Galería dinámica.

Recomendaciones: Es muy importante estudiar la altura a la que se instala la galería, ya que debe respetar el gálibo mínimo, incluso tras un desprendimiento.

Normativa aplicable:

- UNE-EN 10034:1994 Perfiles I y H de acero estructural. Tolerancias dimensionales y de forma. (Versión oficial EN 10034:1993).
- ETAG027 Guideline for European technical approval of falling rock protection kits
- Guideline for the approval of rock protection kits. FOEN (Suiza).

Anejo VIII. Metodología de diseño de medidas de control y protección de caída de rocas.

VIII.1 Verificación del informe geotécnico

Los trabajos de esta fase, serán adicionales y complementarios a los realizados en el estudio geológico y geotécnico (capítulo 4 de la Guía) y tendrán la finalidad de verificar la información y las conclusiones asumidas o, en su caso, la de recopilar nuevos datos, así como la obtención de los parámetros intervinientes en los cálculos, que sean necesarios para el diseño de la solución que se vaya a proyectar. Los trabajos a desarrollar serán los siguientes:

- Verificación del contenido del informe geológico-geotécnico: se prestará especial atención a la definición del elemento a proteger, identificación de inestabilidades, áreas fuente, y datos geológicos y geotécnicos.

- Localización y definición detallada de todas las áreas fuente: el técnico encargado del diseño de las soluciones deberá localizar con precisión y definir las áreas fuente que serán tenidas en cuenta en la realización de los cálculos.

- Verificación de los parámetros de diseño y caracterización del macizo o talud.

Además, se realizará una recopilación de los siguientes datos para la definición de los parámetros de cálculo:

- Definición de la superficie de la ladera o talud: se tomarán datos descriptivos de su situación como presencia de vegetación, estado del macizo, etc.
- Coeficientes de restitución, R_t y R_n : los cálculos requieren establecer coeficientes de restitución para cada material que compone el talud o ladera y su localización física para introducirla correctamente en el modelo. El Cuadro VIII.1 ofrece información sobre los rangos de valores de coeficientes más frecuentemente utilizados por los expertos del sector en Canarias. Será responsabilidad del proyectista aplicar los más adecuados y justificar que los parámetros elegidos se ajustan a las características reales del talud o ladera sobre el que se diseñarán las medidas.

Cuadro VIII.1. Coeficientes de restitución recomendados.

Superficie de talud/ladera		Combinación datos (Sin cubierta vegetal)					
		Coeficientes de restitución					
		Rango de valores		Valor característico		Desviación estándar	
		Rt	Rn	Rt	Rn	Rt	Rn
Coladas y macizos rocosos masivos sanos (basálticos y sálicos) [RCS >= 25 MPa]		0,87-1	0,37-0,6	0,9	0,45	0,042	0,119
Coladas y macizos rocosos masivos alterados (basálticos y sálicos) [RCS <25]		0,85-0,9	0,36-0,5	0,85	0,36	0,019	0,099
Materiales piroclásticos y escorias de lava	Débilmente Soldados [RCS de 1 a 10 MPa]	0,70-0,85	0,3- 0,4	0,8	0,4	0,048	0,033
	Sueltos	0,60-0,83	0,32-0,35	0,8	0,34	0,071	0,013
Depósitos aluvio-columviales		0,64-0,80	0,30-0,40	0,7	0,32	0,050	0,033
Suelos arcillosos y limosos		0,50-0,80	0,15-0,30	0,6	0,25	0,091	0,048
Suelos granulares		0,50-0,82	0,15-0,32	0,52	0,2	0,097	0,053
Rellenos antrópicos		0,48-0,82	0,20-0,40	0,49	0,2	0,102	0,062
Pavimento asfáltico		0,5	0,3	0,5	0,3		

- Coeficientes de fricción: se deben emplear los coeficientes de fricción de los distintos materiales que forman la ladera o talud.
- Rugosidad de la ladera: también es necesario definir la rugosidad de cada material que conforma la ladera.
- Tamaño y forma de los bloques o volumen de rocas que puedan desprenderse: es necesario realizar una estimación de sus dimensiones para cada área fuente.

VIII.2 Simulación de trayectorias en 3 dimensiones y 2 dimensiones, cálculo de perfiles de energía y alturas de rebote.

El cálculo de las medidas de protección requiere de un estudio de trayectorias y energías en 2D y 3D que permita dimensionar y emplazar las soluciones correctamente con el fin de garantizar su eficacia. Este proceso se realiza mediante la aplicación de programas informáticos de simulación que modelizan las trayectorias de los bólidos que pueden sufrir desprendimientos y permiten determinar sus energías de impacto.

Estos procedimientos tienen implícitos una serie de condicionantes debidos a las configuraciones de los programas de cálculo y a la propia incertidumbre asociada a la toma de datos, consideraciones y suposiciones que deberán especificarse en cada caso. Dichos condicionantes e incertidumbres incluyen, entre otros, los siguientes:

- Se trata de un método de cálculo probabilístico, por tanto no puede conducir a resultados determinísticos.
- Existe un cierto grado de incertidumbre en cuanto a la forma del bloque.
- Lo mismo ocurre con la geometría de la superficie por lo que se exige emplear una cartografía con la mayor resolución posible (mínimo E: 1:1000)
 - Los resultados pueden diferir si se considera o no de la fragmentación del bloque durante la caída.
 - El comportamiento mecánico de la superficie en el impacto (coeficientes de restitución tangencial (R_t), y normal (R_n), coeficiente de fricción (Φ) y rugosidad).
 - La localización geográfica de los diversos materiales que forman la superficie del talud con sus correspondientes coeficientes.

A continuación se describirán los criterios a tener en cuenta para el cálculo durante el proceso de modelización de trayectorias.

VIII.2.1. Datos de partida:

Para poder realizar el análisis de trayectorias, hay que definir previamente algunos parámetros necesarios para el desarrollo de los cálculos. Tendrán que determinarse y justificar los criterios adoptados para ello sobre:

- Las áreas fuente y sus perfiles principales. Para cada área fuente, se tomarán los datos necesarios para obtener el perfil preciso de la ladera.
- El tipo de movimiento esperado. Caída Libre, Rebote, Rodamiento y Deslizamiento.
- Los parámetros geotécnicos de la superficie del talud o ladera: coeficientes de restitución tangencial y normal, ángulo de fricción y rugosidad.
- La determinación de los bloques extremo y ordinario para cada área fuente.
- El análisis de la influencia en el cálculo de la forma del bloque y, si procede, de la posible fragmentación de éste durante su caída.

VIII.2.2. Hipótesis de trabajo. Bloque extremo y bloque ordinario.

La selección del elemento que se empleará para dimensionar una solución pasiva vendrá condicionada por su capacidad de soportar dos niveles de energía simultáneamente: la máxima prevista de impacto que deberá ser capaz de contener y la de servicio debida a desprendimientos de tipo recurrente que además de contener deberá ser capaz de mantenerse en servicio sin mermar su capacidad de retener la máxima prevista. Estas dos hipótesis deben ser contempladas tanto para el análisis en 2D como en 3D.

- **Hipótesis de bloque extremo:** el bloque extremo será aquel bloque pésimo o más desfavorable (mayor volumen) detectado en cada una de las áreas fuente, debiendo estimarse su masa, forma y peso específico. Con él se establecerá la energía máxima de impacto que debe absorber el elemento de protección sin ser rebasado ni entrar en contacto con el elemento a proteger.

- **Hipótesis de bloque ordinario:** el bloque ordinario será aquel tamaño de bloque esperado de forma recurrente y periódica. Debe estimarse al menos su masa, peso específico y forma. Será como mínimo un 10% del bloque extremo más desfavorable. Con él se define el nivel máximo de energía que debe acreditar la pantalla para su adecuado comportamiento en condiciones de servicio. Esta hipótesis será de aplicación únicamente para el caso de que el sistema de protección definido consista en barreras flexibles.

VIII.2.3. Análisis a realizar.

Para cada una de las áreas fuente detectadas se realizarán un mínimo de 50 eventos por simulación para el bloque extremo y otras tantas para el bloque ordinario con las siguientes características:

- Un análisis en 3D para definir la ubicación y el trazado en planta del sistema garantizando un porcentaje de interceptación del 100%.

- Un análisis en 2D que fundamentará el dimensionamiento de la barrera en cuanto a la energía máxima de impacto y la altura de diseño a través de la obtención de los perfiles de energía. Sobre dichos perfiles se deberá ajustar la ubicación de los sistemas definida en el análisis en 3D y comprobar el porcentaje de trayectorias no interceptadas

(*passing rocks*). En cualquier caso se deberá comprobar que el porcentaje de afección al elemento a proteger es del 0%.

VIII.3. Criterios de diseño del sistema de protección:

Obtenidos los resultados de trayectorias y energías, tanto para el análisis 2D como 3D, de las hipótesis de bloques extremos y ordinarios de todas las áreas fuente correspondientes a cada sector, se diseñará la solución de protección, según:

- El bloque pésimo de cada sector, que será el bloque extremo más desfavorable en función de su energía.
- El bloque ordinario, que será el de mayor energía media calculada.
- La altura de diseño será la más desfavorable obtenida mediante los cálculos para bloque pésimo y bloque ordinario ($H_{m\acute{a}x}$) más la dimensión del bloque considerado pésimo.

VIII.3.1. Criterios a tener en cuenta para el diseño de barreras dinámicas.

En el caso de que la solución adoptada consista en la instalación de barreras dinámicas deberá considerarse en la selección del elemento su capacidad para garantizar un nivel de absorción de energía y una elongación suficientes para cumplir con los requisitos de cada situación establecidos de la siguiente manera:

Energía de diseño. De acuerdo con la normativa europea (ETAG-27), la energía de diseño vendrá condicionada por el cumplimiento simultáneo de los siguientes requisitos:

- La energía máxima de impacto obtenida en las simulaciones deberá ser inferior a la MEL certificada para dicho sistema.
- La energía media de impacto obtenida en las simulaciones bajo el criterio de bloque ordinario no deberá superar a la SEL certificada para dicho sistema.

La normativa Europea ETAG-27 (EOTA) define los niveles de energía MEL y SEL de la siguiente manera:

- MEL: Es el Máximo Nivel de Energía (*Maximum Energy Level*). Se define como la energía cinética de un bloque regularizado en el momento de impacto con la red de la barrera, que permita que la barrera intercepte el bloque sin sobrepasarla y que la

elongación o distancia de frenado producida no alcance el elemento a proteger, siendo $MEL \geq 3 \cdot SEL$.

-SEL: Es el Nivel de Energía de Servicio (*Service Energy Level*). Se define como la energía cinética de un bloque tipo en el momento del impacto con la red de la barrera, que permita que esta continúe en servicio siendo $SEL = 1/3 MEL$.

Elongación máxima. También se deberá comprobar que la separación de la barrera con respecto al elemento a proteger sea mayor o igual a la elongación máxima (braking distance) certificada para el ensayo MEL según declaración de prestaciones del mercado CE más una distancia de seguridad que vendrá impuesta por condicionantes operativos o funcionales de la propia vía (despeje lateral o gálibo horizontal, altura libre o gálibo vertical). Así pues, se deberá cumplir, según su caso que:

$$D \geq E + DS$$

Con:

D = Distancia o separación entre la barrera y elemento a proteger adoptando como elementos de referencia los siguientes:

- El borde exterior del carril contiguo al talud o ladera, para medidas laterales.
- La rasante del pavimento en el punto más desfavorable de la plataforma (calzada+arcenes), para medidas verticales.

E = Elongación máxima de la barrera durante la retención para ensayo MEL

DS = Distancia de seguridad considerando los siguientes valores:

- Despeje lateral $DS \geq$ Ancho arcén exterior contiguo (mínimo 0,50 m)
- Altura libre $DS \geq 5$ m

Imagen VIII.1. Distancia de seguridad lateral.

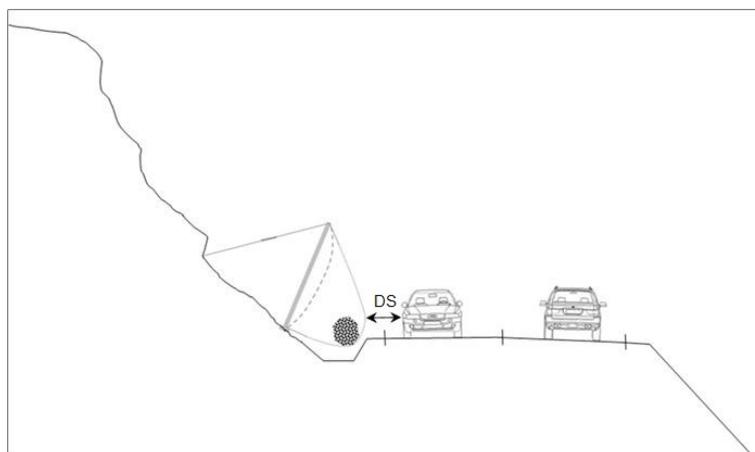
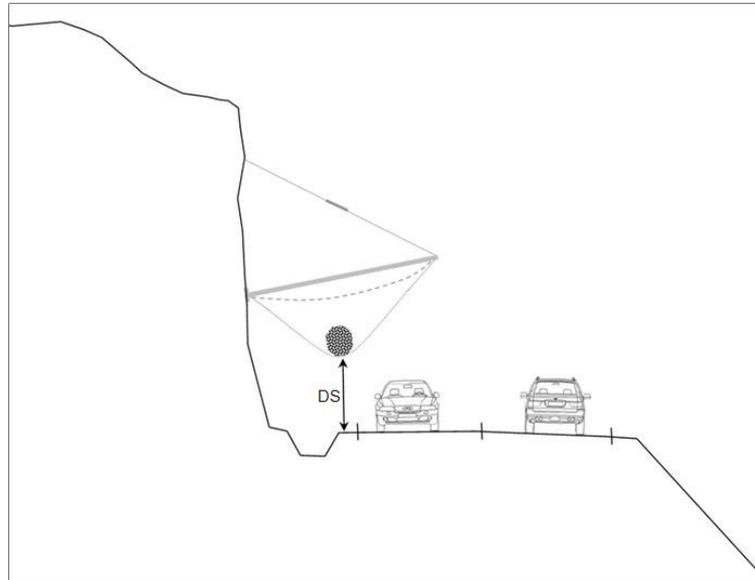


Imagen VIII.2. Distancia de seguridad vertical.



VIII.4. Coeficientes de seguridad a aplicar a los sistemas de protección.

Los factores de seguridad a aplicar en el análisis de estabilidad de taludes o excavaciones permanentes varían según las distintas fuentes. Así, en las guías suizas (2001) el factor de seguridad para taludes y estructuras de contención varía de 1,5 a 2 dependiendo del grado de fiabilidad del procedimiento de cálculo y la representatividad de los datos, para la cimentación de estructuras de protección tales como anclajes, cimentación de postes, etc estas guías recomiendan un coeficiente de seguridad de 1,3. En el manual de diseño del Cuerpo de Ingenieros de EEUU se recomienda un factor de seguridad mayor o igual a 1,5 para taludes permanentes y de 1,2 a 1,3 para taludes temporales. Hoek (1997) recomienda $FS \geq 1,5$ para taludes permanentes. En cualquier caso se deben seguir las recomendaciones establecidas en el Eurocódigo 7.

VIII.5. Mantenimiento y conservación de los sistemas de protección.

Durante el proceso de selección del tipo de sistema de protección más adecuado debe comprobarse el cumplimiento de todos los candidatos de los requisitos anteriores y seleccionar aquel que, de entre ellos, garantice un mayor periodo de vida útil en las

condiciones ambientales en que se encuentra el talud y que permita llevar a cabo las posteriores labores de conservación y mantenimiento con mayor facilidad o menor coste.

Para el correcto funcionamiento, mantenimiento y conservación de cualquiera de los sistemas de protección instalados en la ladera o talud, será necesario establecer un plan de acción que prevea al menos los siguientes puntos:

- Establecimiento de inspecciones periódicas (mínimo anualmente) para verificar el correcto funcionamiento de los sistemas instalados.
- Sustitución de elementos dañados o deteriorados.
- En ubicaciones remotas o de muy difícil acceso, prever la instalación de sistemas de alerta frente a impactos.

Por otro lado, los requerimientos relativos a la vida útil o durabilidad del sistema pueden condicionar la elección del sistema de protección o los materiales que lo conforman.

- Vida útil ≥ 25 años sin impacto y condiciones ambientales normales.
- Vida útil ≥ 10 años sin impacto y condiciones ambientales agresivas.

VIII.6. Control de calidad y documental.

Se deberá realizar un control de calidad de ejecución y de documentación de los sistemas, que como mínimo incluirá los siguientes puntos:

- Certificados de calidad. Marcado CE.
- Fichas de características técnicas de los distintos elementos o dispositivos.
- Manual de instalación del fabricante.
- Ensayos de control (in situ y en laboratorio).
- Certificado del fabricante de la correcta instalación de la barrera.

Referencias bibliográficas:

- Agencia Estatal de Meteorología AEMET, 2018. *Plan Nacional de Predicción y Vigilancia de Fenómenos Meteorológicos Adversos: METEOALERTA*. Versión 7.
- Asociación de Carreteras del Japón (JRA) (1984). *Manual de protección de taludes*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil. CISMID.
- Australian Geomechanics Society (2007). *Practice note guidelines for landslide risk management. Landslide practice note Working Group*. Journal and News of the Australian Geomechanics Society, vol. 42, nº 1, 53 pp.
- Ayala, F.J., Andreu, F.J., Fe, M., Ferrer, M., de Simón, A., Fernández, I., Olalla, C., Gómez, J., Sanpedro, J. y Cienfuegos, F.J. (1987). *Manual de Taludes*. Serie Geotecnia. IGME. Madrid. 456 pp.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. *Rock mechanics*, 6(4), 189-236. doi: 10.1007/bf01239496.
- Bieniawski, ZT, 1976. *Rock mass classifications in rock engineering. Exploration For Rock Engineering*, A.A. Balkema, Cape Town, 97-106.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a Complete Manual*. John Wiley and Sons, New York.
- Budetta, P. (2004). *Assessment of rockfall risk along roads*. *Natural Hazards Earth Syst. Sci.*, 4, pp. 71-81.
- Corominas, J., Matas, G., Ruiz Carulla, R. (2018). "Quantitative analysis of risk from fragmental rockfalls". *Landslides*. Doi:10.1007/s10346-018-1087-9.
- Corominas, J., Copons, R., Moya, J., Vilaplana, J.M., Altimir, J., Amigó, J., (2005). "Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area". *Landslides*. Doi: 10.1007/s10346-005-0022-z.
- Delonca, A. et al (2014) *Statistical correlation between meteorological and rockfall databases*. *Natural hazards and earth system sciences*. Vol. Junio 2014.
- Dikau, R., Brundsen, D., Schrott, L. and Ibsen, M. L. (1996). *Introduction. In: Landslide recognition. Identification, movement and causes*. Dikau, Brundsen, Schrott and Ibsen (Eds). John Wiley & Sons, pp. 1-12.
- EPOCH (1993). Flageolet, J. C. (Ed). *Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community*, vol.1. Contract nº 90.0025.
- ETAG 027. *Guideline for European technical approval of falling rock protection kits*.
- European Environment Agency EEA, 2010. *Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe — An overview of the last decade 2010 – 144 pp. – 21 x 29.7 cm ISBN 978-92-9213-168-5, doi:10.2800/62638*

- -Fell R., Ho K.K.S., Lacasse S., Leroi E. (2005) *A framework for landslide risk assessment and management*. International Conference on Landslide Risk Assessment and Management. Vancouver, BC, Canada
- Ferrer, M., y Ayala, F. (1996) *Correlation of climatic data and release of some large slope movements in Spain*. Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Ferrer, M. y González de Vallejo, L. (2007). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos de campo en afloramientos. IGME. 131 pp.
- Fonseca, R. 2010. Aplicación de Membranas flexibles para la prevención de riesgos naturales. Ed.Geobruigg Iberica.
- González de Vallejo, L. et al (2017) *Los taludes en España en los últimos 50 años*. 50 Aniversario. Sociedad Española de Mecánica de Rocas. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas - CEDEX -.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2010). *Ingeniería Geológica*. Caps. 9 y 14. Pearson, Prentice-Hall. Madrid. 715 pp.
- González de Vallejo, L. I., Hijazo, T., Ferrer, M., y Seisdedos, J. (2006). Caracterización geomecánica de los materiales volcánicos de Tenerife. Madrid. IGME.
- González de Vallejo, L. y Miranda, A. (2017), “*Informe Conclusiones I: Sistema de evaluación de inestabilidad de laderas en función de sus factores condicionantes y desencadenantes*”, INVOLCAN. [Inédito]
- González de Vallejo, L. y Miranda, A. (2018), “*Informe conclusiones II: Métodos de identificación y valoración de inestabilidades. Diseño de medidas de protección*”.
- González-Gallego, J. *Estabilidad de taludes. Barreras dinámicas. II Jornadas canarias de geotecnia*. Laboratorio de Geotecnia CEDEX.
- González-Gallego, F. J. (2008). *Clasificaciones Geomecánicas (Aplicación a Rocas Volcánicas)*. En: II Jornadas Canarias de Geotecnia, Tenerife, Canarias, (inédito).
- -Hernández Gutiérrez, Luis E (2013). *La playa de La Arena en Tacoronte: Historia de la estabilidad de una ladera*. Ediciones IDEA.
- Highland, L.M. y Bobrowsky, P. (2008). *Manual de derrumbes. Guía para entender todo sobre los derrumbes*. Servicio Geológico de los EE.UU. Circular 1325. Reston, Virginia. 129 pp.
- Hoek, E. and Brown, E.T. (1997). *Practical estimates of rock mass strength*. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Elsevier.
- Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam, Netherlands; Brookfield, VT, USA: A.A. Balkema.
- Hutchinson, J.N. (1988). *General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology*. Proc.5th Int. Symp. on landslides, Lausanna. Tomo 1,pp. 3-36

- IGME (1987). Varios autores. *Manual de Taludes*. Madrid.

- IPCC, 2014. *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas*. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs. (en árabe, chino, español, francés, inglés y ruso).

- ISRM (1978). *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15(6), 319-368. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)91472-9](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(78)91472-9)

- JTC-1 Joint Technical Committee on landslides and engineered slopes. *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning*. Febrero 2008.

- Keefer, D.K. (1984). *Landslides caused by earthquakes*. Geological Society of America Bulletin. Vol. 95, pp. 406-421.

- Keefer, D.K. (1994). *The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions*. Geomorphology, Vol. 10, pp. 265-284.

- Leiva, Sergio (2003). *Procedimiento de actuación en macizos rocosos con pendiente superior al 15 %*. (Tercera edición). Departamento Edificación-CEMOSA.

- Malla Talud Cantabria (2004). *Protección pasiva contra desprendimientos*. Iberobarrera.
- Margottini C.; Spizzichino D. and Onorati G., 2007. *Cambiamenti climatici, dissesto idrogeologico e politiche di adattamento in Italia: un percorso tra passato presente e futuro. Conferenza nazionale sui Cambiamenti Climatici 2007*. Roma 12–13 settembre 2007 Palazzo della FAO.

- Marinos, V., Marinos, P., Hoek, E. (2005). *The geological strenght index: applications and limitations*. Bull Eng Geol Environ 64: 55-65.

- Marinos, P., & Hoek, E. (2001). *Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 60(2), 85-92. doi: 10.1007/s100640000090.

- Marques, R. et al. (2008) *Rainfall patterns and critical values associated with landslides in Povoação County (São Miguel Island, Azores): relationships with the North Atlantic Oscillation*. Hydrological Process. Vol 22, Issue 4. 15 Feb. 2008. Págs. 478–494.

- Ministerio de Fomento. Muñiz, M., González-Gallego, J. (2017) *Estudio del desarrollo de una clasificación geomecánica para evaluar el riesgo de inestabilidad de taludes en los materiales volcánicos de las islas Canarias*. CEDEX.

- Ministerio de Fomento. Varios autores (1996). *Protección contra desprendimiento de rocas. Pantallas dinámicas*.



- Miranda, T., Sousa, L. R., Gomes, A.T., Tinoco, J., Ferreira, C. (2018). *Geomechanical characterization of volcanic rocks using empirical systems and data mining techniques*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Págs. 138-150. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.11.003>
- Mulas, J., Ponce de León, D., Martínez, M. y Pardo, J.M. (2001). *Diseño de una metodología para zonificación de inestabilidad de laderas producidas por terremotos. Aplicación a una zona del Pirineo Central*. Informes Técnicos nº 2. IGME.
- Muñoz Menéndez, M., González-Gallego, F.J. (2014) *Las clasificaciones geomecánicas en macizos rocosos volcánicos. Ingeniería geológica en terrenos volcánicos. Métodos y Experiencias en las islas Canarias*. Hernández, L.E. y Santamarta, J.C. Eds. (En prensa).
- Nocito Muñoz, M. (2010). *Inestabilidad de laderas en rocas volcánicas*. Tesina del Máster en Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica del CEDEX, Ministerio de Fomento, (inédito).
- Philip, H., Ritz, J.-F., 1999. *Gigantic paleolandslides associated with active faulting along the Bogd fault (Gobi-Altay, Mongolia)*. Geology, 27, 211–214.
- -Ramírez Oyanguren, P., Alejano Monge, L. (2004) *Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de taludes*. Caps. 15 y 16.
- Roberto Fonseca, 2010. *Aplicación de Membranas flexibles para la prevención de riesgos naturales*. Ed. Geobrujg Ibérica.
- Rochert, L. (1987). *Developpement des modeles numeriques dans l'analyse de la propagation des eboulements rocheux*. Proc. 6th Int. Congr. Rock Mech. I. PP. 479-484. Montreal.
- Romana, M. (1984). *New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slope-International Symposium on Role of Rock Mechanics, Zacatecas, Mexico*.
- Romana, M. (1997). *El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de la estabilidad de taludes. IV Simp. Nacional sobre Taludes y Laderas inestables*. Vol. III, pp 955-1011.
- Serrano, A., Olalla, C., & Perucho, A. (2002). *Evaluation Of Non-Linear Strength Laws For Volcanic Agglomerates*. Paper presented at the ISRM International Symposium - EUROCK 2002, Madeira, Portugal.
- Segoni, S. et al (2014) *Analysing the relationship between rainfalls and landslides*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14, 2637–2648, 2014.
- Serrano, A., Olalla, C., Perucho, A., y Hernández, L. E. (2008). *Resistencia y deformabilidad de piroclastos de baja densidad*. En: II Jornadas Canarias de Geotécnica, Tenerife, (inédito).
- Singh, A. and Connolly, M. (2003). *VRFSSR – An Empirical Method for Determining Volcanic Rock Excavation Safety on Construction Sites*, Journal of the Institution of Engineers (India), Vol. 84 (3), pp. 176-191.

- Suárez Díaz, J. *Deslizamientos. Tomo II: Técnicas de Remediación.*
- Varnes, D. J. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice.* Natural Hazards, 3. UNESCO.
- Vogel, T., Labiouse, V., Masuya, H. (2009). *Rockfall Protection as an Integral Task.* Structural Engineering International. DOI: <http://dx.doi.org/10.2749/101686609788957856>
- Wilson, R.C. y Keefer, D.K. (1985). *Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding. In Evaluating earthquake hazards in Los Angeles region;* ed. J.I. Ziony. U.S. Geological Survey. Professional Paper 1360, pp. 317-345.
- Wyllie, D.C. 2014 *Rock Fall Engineering.* CRC Press.
- -Wyllie & Mah. 2004. *Rock Slope Engineering.* 4th. Ed. Spon Press.
- Abramson, L. W., Lee, T.S., Sharma, S. e Boyce, G. M. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods (2nd ed.),* John Wiley & Sons, Inc., New York, USA. 712 p.
- Antunes, P. C. (2008). Estudo hidrogeoquímico e vulcanológico de lagos no arquipélago dos açores: aplicações para a mitigação de riscos naturais. Tese de doutoramento. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores, pp 306.
- Amaral, P. (2010). Caracterização geotécnica e hidrológica de depósitos vulcânicos: Modelação da estabilidade de taludes no concelho da Povoação (ilha de S. Miguel – Açores). Dissertação de Doutoramento em Geologia especialidade de Vulcanologia. Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, pp 277.
- Carmo, R. (2013). Estudo da neotectónica na ilha de S. Miguel. Uma contribuição para o estudo do risco sísmico no arquipélago dos Açores. Tese de doutoramento. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores, pp 306.
- Cruden, D. M. e Varnes, D. J. (1996). *Landslide Types and Processes.* In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. (Eds.) *Landslides. Investigation and Mitigation.* Transportation Research Board. Special Report 247. National Academy Press. Washington D. C. p. 36-75.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L. e Ibsen, M.-L. (Eds.) (1996). *Landslide Recognition – Identification, Movement and Causes.* John Wiley and Sons. Chichester. 251 p.
- Gaspar, J.L. (1996). Ilha Graciosa (Açores): História Vulcanológica e Avaliação do Hazard. Tese de doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia. Universidade dos Açores, Departamento de Geociências, 256 p.

- Gaspar, J.L., Wallenstein, N., Coutinho, R., Ferreira, T., Queiroz, G., Pacheco, J., Guest, J., Tryggvason, E. e Malheiro, A. (1997). Considerações sobre a ocorrência dos movimentos de massa registados na madrugada de 31 de Outubro de 1997 na ilha de S. Miguel, Açores. Relatório técnico-Científico 17/DGUA/97, Centro de Vulcanologia, 28 pp.
- Lupini, J.F., Skinner, A.E. & Vaughan, P.R. (1981). The drained residual strength of cohesive soils. *Géotechnique*, Vol. 31, No. 2, pp. 181-213.
- Marques, R., Zêzere, J. L., Amaral, P., Gaspar, J.L & Queiroz, G. (2010). Desenvolvimento de um Sistema Empírico de Alerta para Movimentos de Vertente (ELEWS-Pov) através da aplicação da Distribuição Generalizada dos Valores Extremos (dGVE) na determinação de limiares de precipitação no Concelho da Povoação. V Congresso Nacional de Geomorfologia. Porto.
- Marques, R., Amaral, P., Araújo, I., Gaspar, J.L & Zêzere, J. L. (2015). Landslides on São Miguel Island (Azores): susceptibility analysis and validation of rupture zones using a bivariate GIS-based statistical approach. Eds. Gaspar, J.L., Guest, J.E., Ducan, A.M., Barriga, F.J.A. & Chester, D. k. volcanic Geology of São Miguel island (Azores Archipelago). Geological Society, London, *Memoirs*, 44, 167-184.
- Needham, H. D. e Francheteau, J. (1974). Some characteristics of the rift valley in the Atlantic Ocean near 36°48' north. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 22, 29-43p.
- Varnes, D.J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In SCHUSTER, R.L.; KRIZEK, R.J. (Eds.), *Landslides, Analysis and Control*, Transportation Research Board Special Report, 176, Washington D.C., p.11-33.
- WORKING PARTY ON WORLD LANDSLIDE INVENTORY, UNESCO (1993). Multilingual landslide glossary. International Geotechnical Societies, Canadian Geotechnical Society, Richmond.