

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.

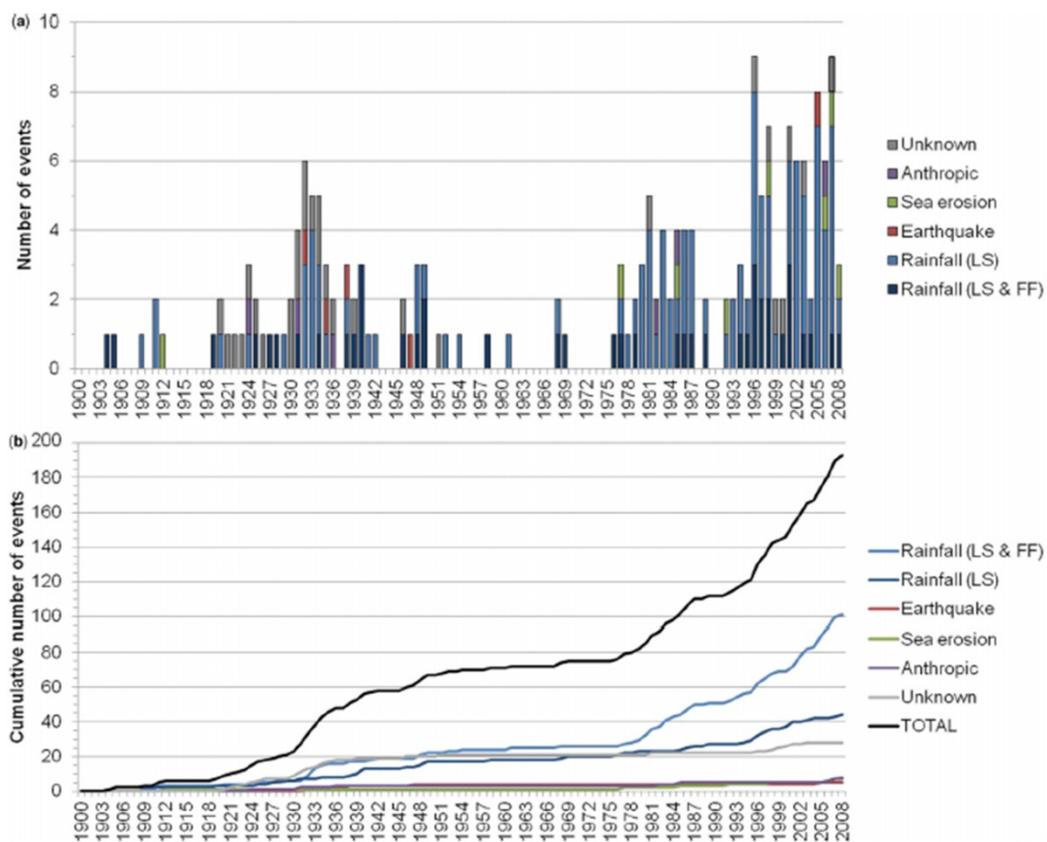


Figura 1.8. Distribución temporal de movimientos destructivos en la isla de San Miguel entre 1900 y 2008, teniendo en cuenta el factor desencadenante: (a) frecuencia anual; (b) frecuencia acumulativa. LS, deslizamiento; FF, colada (Adaptado de Marques et al., 2015).

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.

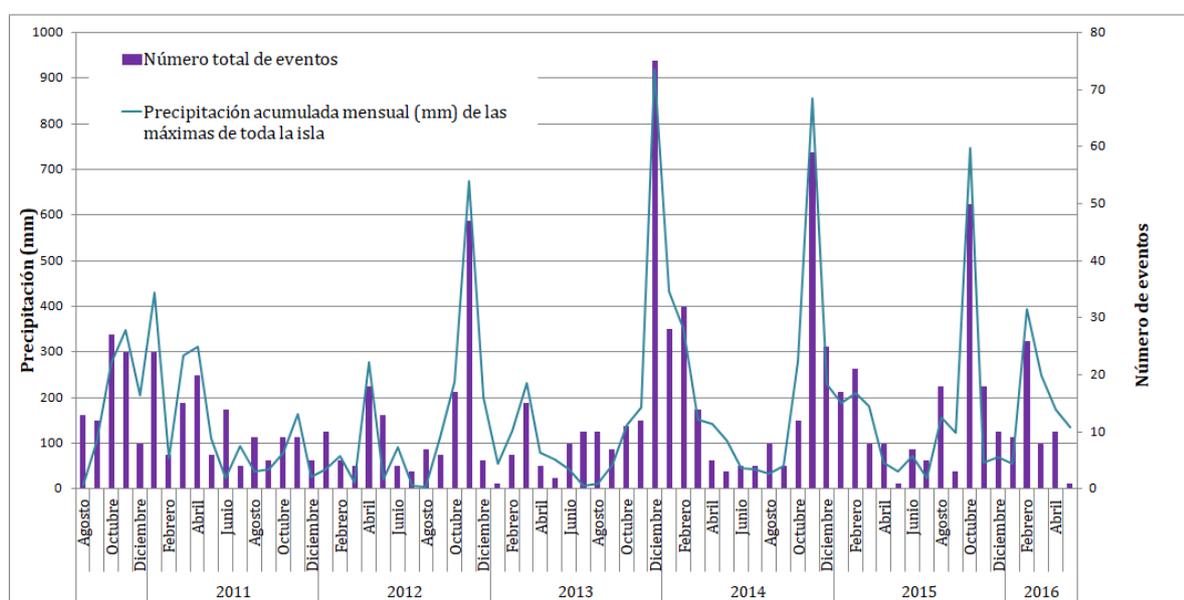


Figura 1.9. Influencia de la precipitación mensual con la cantidad de inestabilidades producidas. La línea azul representa la precipitación acumulada mensual y las barras la cantidad de sucesos producidos en ese mes.

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.

ESTUDIO 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.

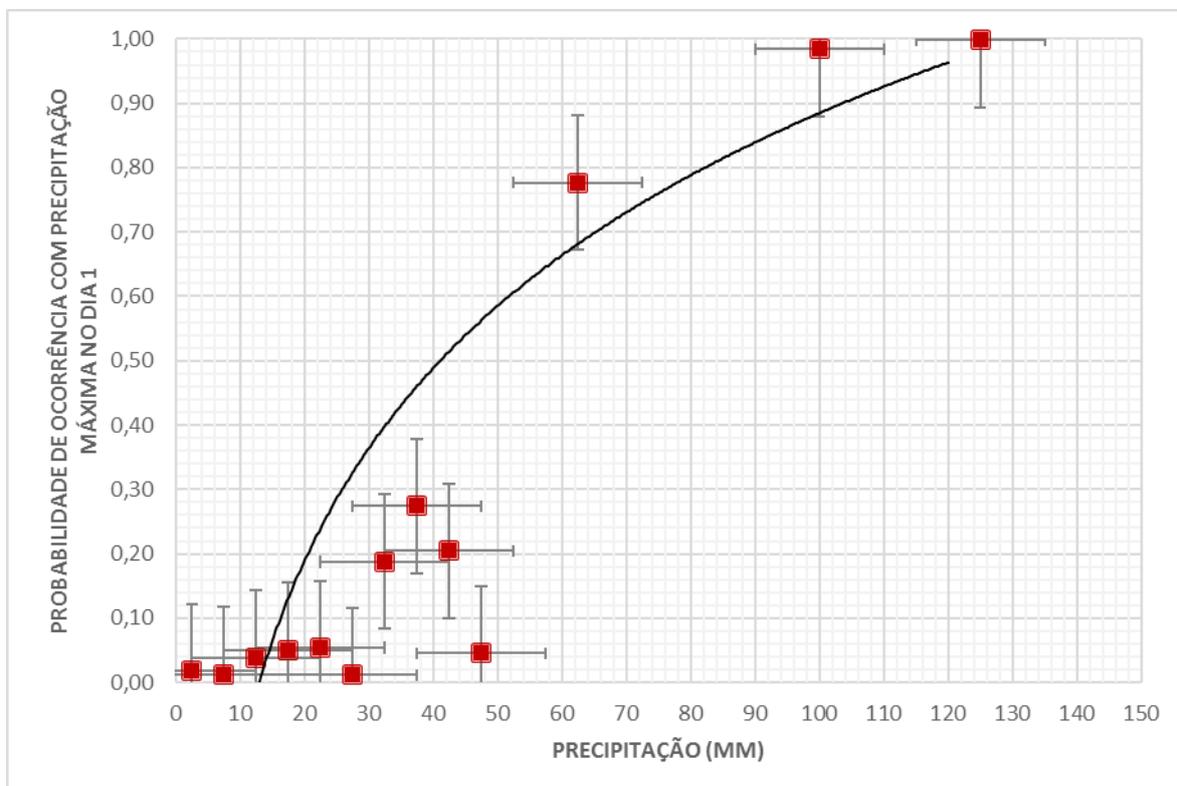


Figura 1.10. Gráfica de probabilidad de inestabilidad en el intervalo de precipitación, en el mismo día.

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%.

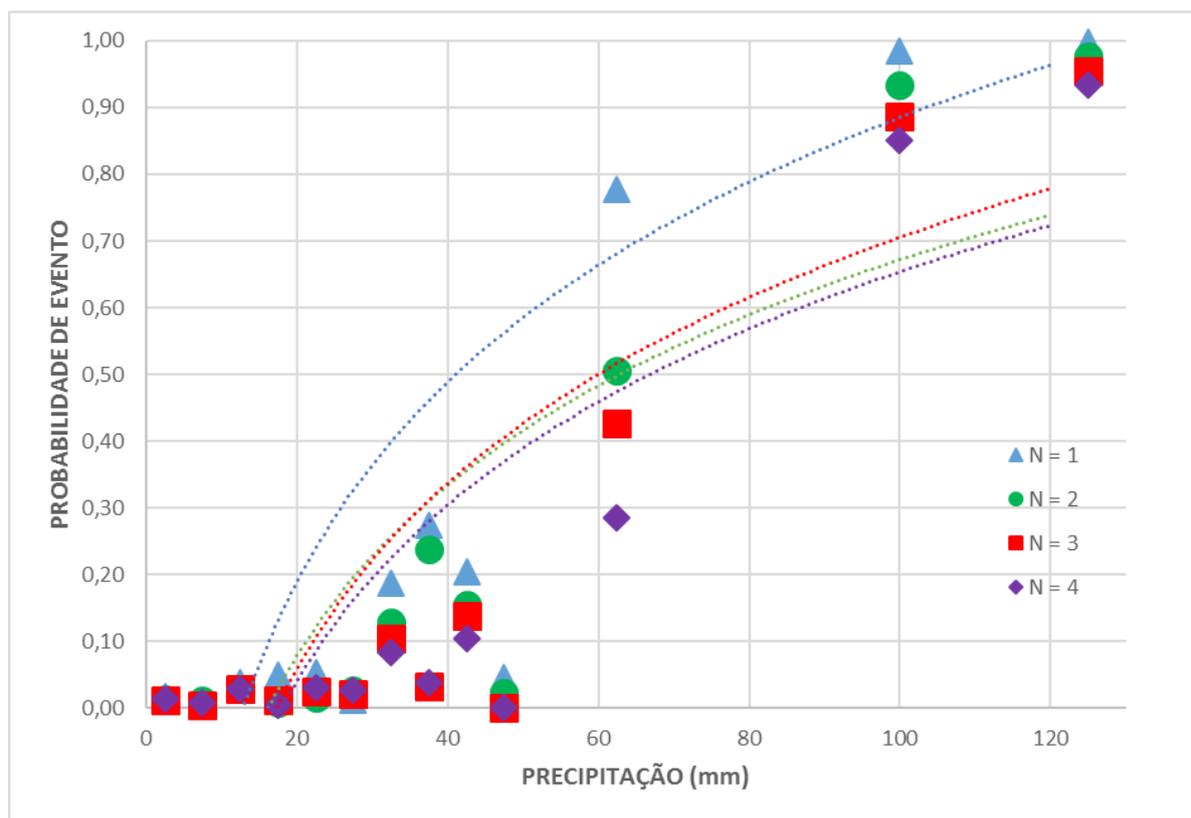


Figura 1.11. Probabilidad de ocurrencia de inestabilidad geomorfológica en función de la precipitación.

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.

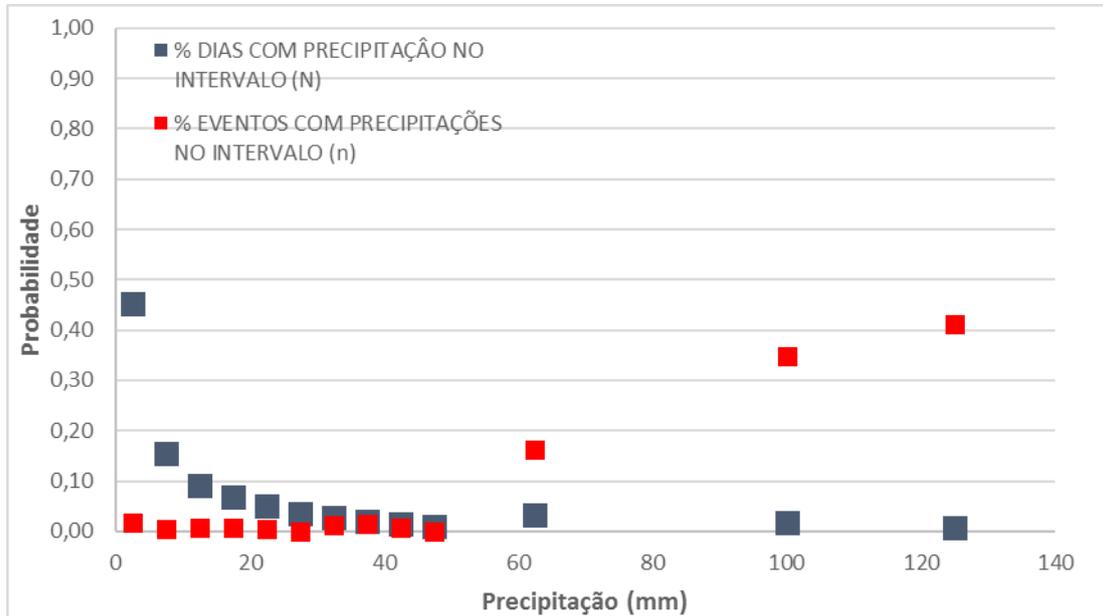


Figura 1.12. Relación entre el % de días con precipitación en el intervalo N (azul) y el % de inestabilidades que ocurrieron para ese nivel de precipitación (rojo).

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.

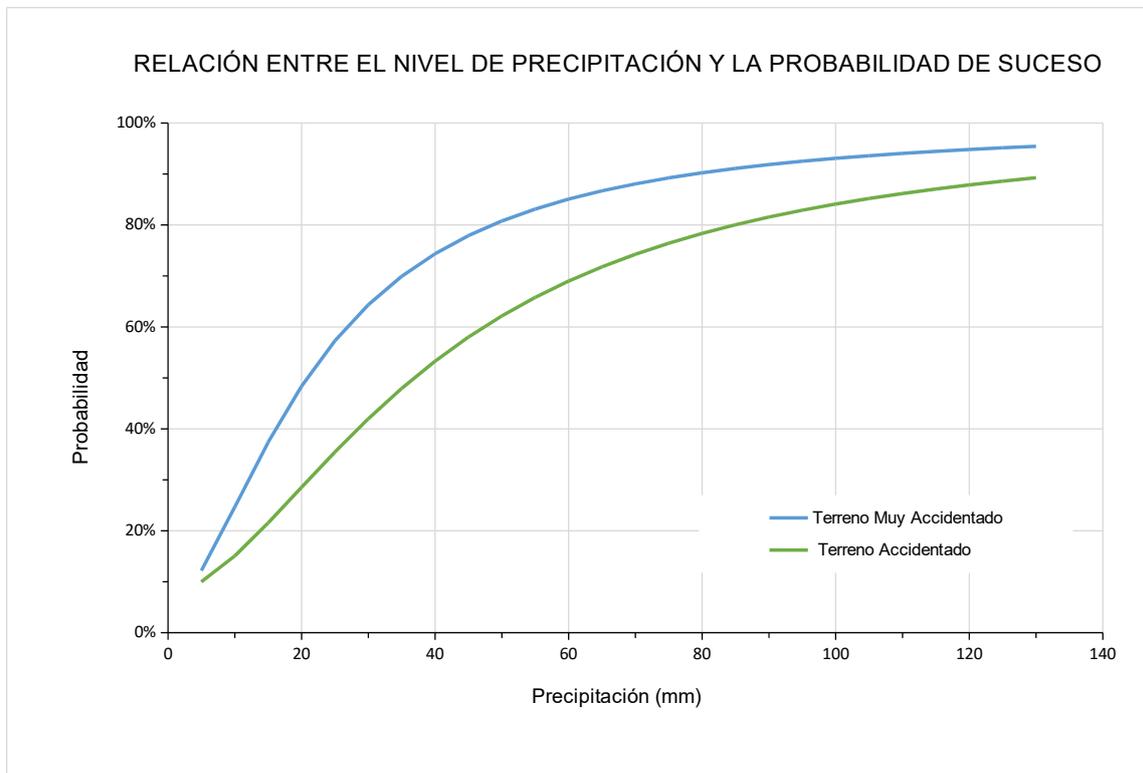


Figura 1.13. Gráfica que relaciona niveles de precipitación y probabilidades de desencadenamiento de inestabilidades para territorios de relieve accidentado y muy accidentado.

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.

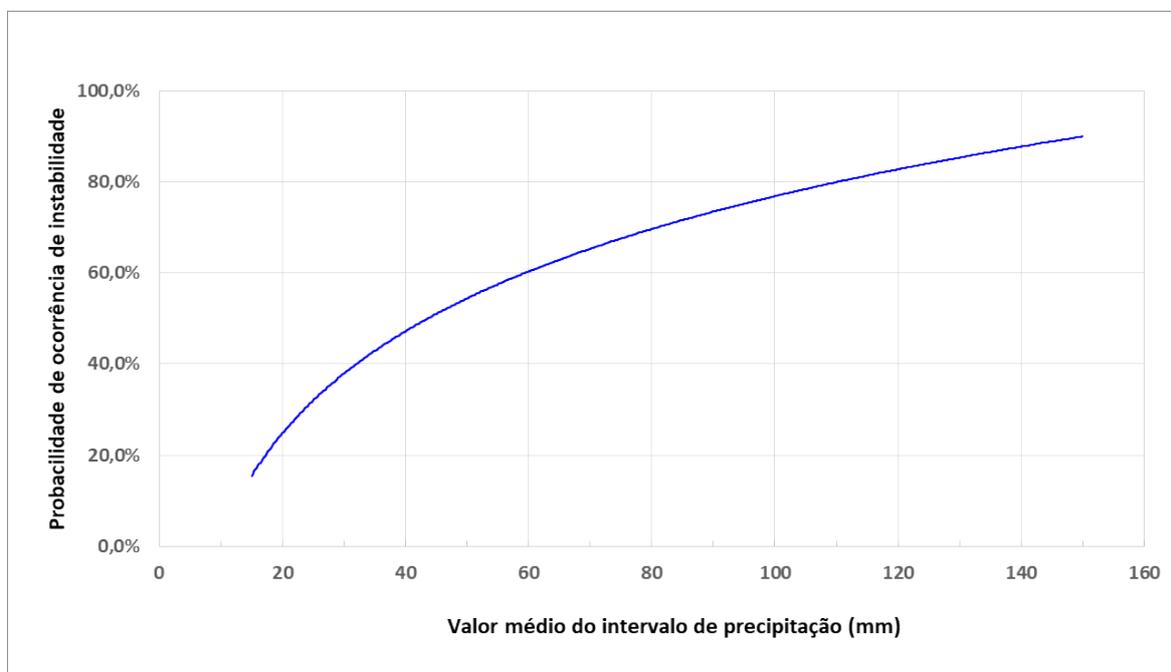


Figura 1.14. Gráfica probabilidad de inestabilidad en el intervalo de precipitación diaria en la isla de Madeira

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.

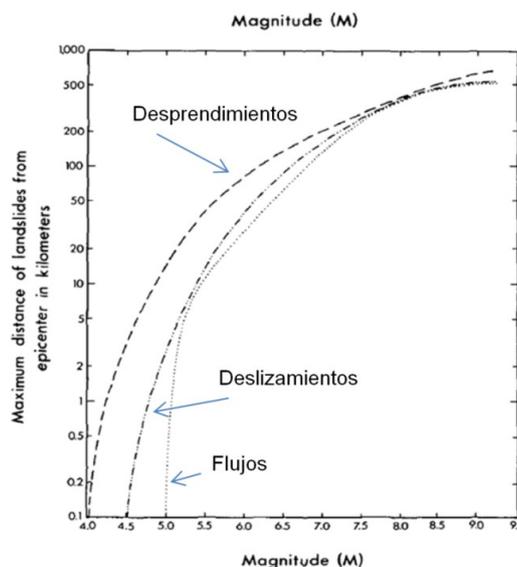


Figura 1.16. Relación entre la magnitud del terremoto y la distancias epicentral para el desencadenamiento de diferentes tipos de movimientos (Keefer, 1984).

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.