

## 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 <sup>3</sup>	0,5-1 m <sup>3</sup>	1-5 m <sup>3</sup>	5-10 m <sup>3</sup>	>10 m <sup>3</sup>
--------------------	----------------------	--------------------	---------------------	--------------------

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

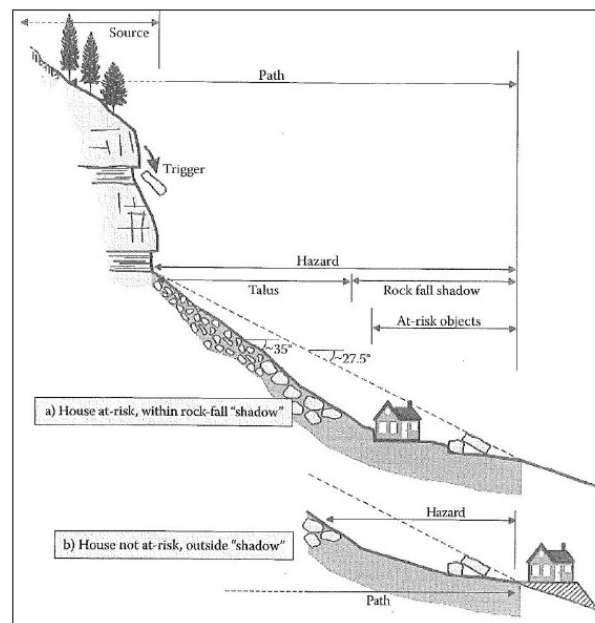
$$P_{(L)} = N^{\circ} \text{ eventos registrados} / \text{años} \tag{5.3}$$

### 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  $25^\circ$  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  $30^\circ$  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 $\text{m}^3$	0,2
	5- 10 $\text{m}^3$	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.