

APROXIMACIÓN PROBABILÍSTICA AL NÚMERO Y TAMAÑO DE BLOQUES EN DESPRENDIMIENTOS CON FRAGMENTACIÓN

José MOYA^{1*}, Jordi COROMINAS¹, Olga-Christina MAVROULI¹ y Ramon COPONS²

¹ Dept. de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universidad Politécnica de Cataluña

² Centre d'Estudis de la Neu i de la Muntanya d'Andorra (CENMA)
Institut d'Estudis Andorrans (IEA)

RESUMEN

La mayoría de las masas rocosas que se desprenden se fragmentan en los primeros impactos contra el terreno. El riesgo asociado a los desprendimientos debe calcularse, por lo tanto, teniendo en cuenta este proceso de fragmentación. Para incorporar la fragmentación en la simulación de trayectorias es necesario prever el número y el volumen de los fragmentos rocosos resultantes en cada desprendimiento. Se presenta aquí un método para estimar estas dos variables. Se parte de la hipótesis que la distribución del volumen de los bloques acumulados en el canchal puede ser utilizada para generar aleatoriamente conjuntos de bloques, cada uno de ellos simulando el conjunto de bloques resultantes de un desprendimiento. Esta aproximación se ha aplicado a un canchal del Solà d'Andorra, Andorra la Vella (Principado de Andorra). La validez del método se ha contrastado comparado los resultados obtenidos con lo observado en desprendimientos recientes, inventariados por un plan de vigilancia de la zona.

1. INTRODUCCIÓN

Los desprendimientos son uno de los riesgos geológicos más frecuentes en laderas rocosas de gran pendiente, particularmente en zonas de montaña. Se trata de fenómenos rápidos y difíciles de predecir en el tiempo. Dado el desarrollo turístico de estas zonas, existe una necesidad creciente de evaluación del riesgo de estos fenómenos y que ésta se realice de la forma más realista posible.

En los últimos años, la evaluación del riesgo de desprendimientos se ha abordado cuantitativamente (Hungar et al., 1999; Corominas et al., 2005a; Agliardi et al., 2009; Li et al., 2009). El movimiento de bloques desprendidos ha sido estudiado extensamente y existen en la actualidad varios programas de simulación en 3D para modelizar la trayectoria de los bloques (Guzzetti et al., 2003; Agliardi and Crosta, 2003; Dorren et al., 2006, Scioldo, 2006; Bourrier et al., 2009, Agliardi et al. 2009). Una vez definidos los puntos de origen potenciales de desprendimientos, estos programas permiten calcular la energía cinética y el alcance de los bloques y, a partir de aquí, realizar una zonación del área expuesta en función de los daños potenciales.

El análisis de trayectorias es sólo una de las facetas de la evaluación del riesgo de desprendimientos, existen, sin embargo, otros aspectos que apenas han sido abordados. Uno de dichos aspectos es la fragmentación de la masa desprendida. En efecto, se ha observado que la mayoría de las masas rocosas que se desprenden se rompen al impactar con el suelo y liberan varios bloques que toman trayectorias y energías diferentes e independientes. La fragmentación es uno de los aspectos menos estudiados de este tipo de movimiento de ladera y, aunque se observa en muchos casos, no suele tenerse en cuenta para el diseño de barreras de protección (Agliardi and Costa, 2003; Giacomini et al., 2009). Realmente, no es sencillo predecir el número y tamaño de los fragmentos a partir de un volumen inicial de roca. De hecho, actualmente en la simulación de trayectorias suele suponerse la caída de bloques individuales de ciertos tamaños que no se fragmentan. Lo anterior es poco realista y constituye una de las limitaciones más importantes de la simulación de desprendimientos.

La importancia de la fragmentación en la evaluación del riesgo reside, entre otros motivos, en la posibilidad de que los fragmentos sigan trayectorias muy diferentes a los bloques intactos (los utilizados para diseñar las barreras) con el peligro consecuente que sobrepasen la barrera de protección (Giacomini et al., 2009). Por otro lado, si la fragmentación no es tomada en cuenta no es posible calcular la probabilidad de que dos o más bloques, con energía mayor a determinado umbral, puedan llegar simultáneamente o casi simultáneamente a la zona expuesta al riesgo, o a una barrera de protección. Las barreras de protección raramente están diseñadas para recibir el impacto casi simultáneo de varios bloques de gran energía. Se plantea entonces un problema de valoración del riesgo residual (el riesgo que permanece después de la implantación de medidas de mitigación). En consecuencia, una estimación más realista del riesgo requiere incorporar el proceso de fragmentación de las masas desprendidas. Son muy pocas las aportaciones que se pueden encontrar en este campo (Nocilla et al., 2009; Wang and Tonon, 2011; Corominas et al., 2012). Apenas existen datos sobre este proceso complejo y es difícil de modelizar físicamente.

Para introducir la fragmentación en el análisis del riesgo de desprendimientos, y en particular en el análisis de trayectorias, es necesario determinar cuál es el número y el volumen de los fragmentos rocosos. En esta comunicación se presenta una aproximación

metodológica para estimar estas dos variables, aproximación que está basada en observaciones geomorfológicas, concretamente en la distribución del volumen de los bloques que se encuentran al pie del escarpe rocoso, y en la simulación probabilística. El método se ha aplicado a un canchal del Solà d'Andorra, Andorra la Vella (Principado de Andorra) y los resultados obtenidos se han comparado con los volúmenes de bloques de desprendimientos recientes inventariados, y que ha sido facilitados por el Plan de Vigilancia de la zona establecido por el Gobierno de Andorra.

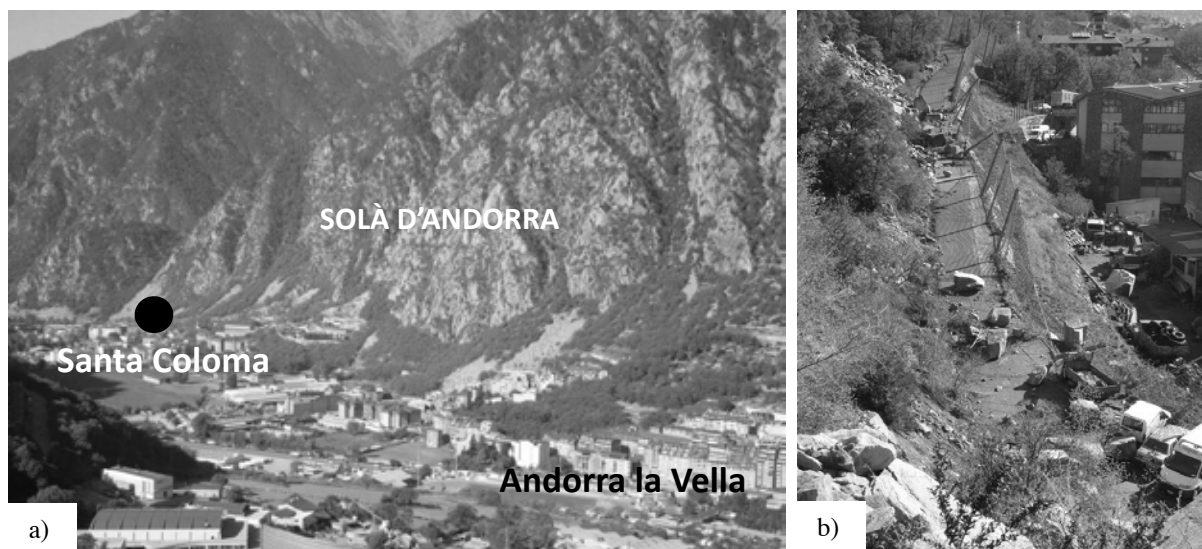


Figura 1. Contexto de la zona de estudio. a) Situación del Solà d'Andorra. En la fotografía pueden apreciarse la gran pendiente del área fuente y los canchales situados al pie de la ladera rocosa. El círculo negro de la foto indica la situación de la imagen 1b. b) Vista del desprendimiento de abril de 2008. Varios bloques fueron detenidos por la barrera dinámica y se observan en la pista que hay ladera arriba; otros bloques de grandes dimensiones rebasaron la barrera y uno de ellos impactó contra un edificio.

2. ZONA DE ESTUDIO

2.1. Contexto geológico y geomorfológico

El Solà d'Andorra es una ladera rocosa que se extiende a lo largo de más de dos kilómetros en la margen derecha del valle del Gran Valira (Andorra la Vella, Principado de Andorra) (Figura 1). La máxima altitud se alcanza en el pico de Carroi (2332 m), mientras que el fondo de valle se encuentra en torno a los 980 m. Las pendientes son altas, localmente mayores a 60°, en la parte superior de la ladera donde aflora el sustrato rocoso. El sustrato está formado por un macizo granodiorítico, en el que se encuentran cinco familias de fracturas (Copons, 2004). Las cicatrices frescas de desprendimientos y las grietas abiertas son abundantes en el Solà d'Andorra, lo que evidencia la intensa actividad de caída de bloques. El área fuente está incidida por varios canales, que conducen la mayoría de bloques caídos hacia la parte baja de la ladera, donde se acumulan formando canchales.

2.2. Antecedentes sobre la evaluación del riesgo de desprendimientos en el Solà d'Andorra

El problema de los desprendimientos es recurrente en el Solà d'Andorra y el riesgo asociado es manifiesto. Durante los últimos 50 años se han observado una treintena de caídas de bloques en la zona, con volúmenes generalmente inferiores a 100 m^3 . El volumen individual de los bloques varía típicamente entre los 0.5 y los 25 m^3 . La mayoría de estos desprendimientos alcanzaron la parte baja de los canchales y se aproximaron a las edificaciones existentes. En diciembre de 1983 y en enero de 1994, varios bloques desprendidos impactaron contra edificios recientemente construidos. El caso más peligroso fue el ocurrido el 21 de enero de 1997 en el canal de la Alzina, en el que un bloque de 25 m^3 impactó contra un edificio de viviendas causando un herido grave. Más recientemente, el 20 de abril del 2008 sucedió un desprendimiento de unos 150 m^3 en el canal del Forat Negre, colindante con el anterior. Varios bloques impactaron en la barrera dinámica situada en la parte baja del canchal, justo sobre la zona urbana (Figura 1b), tumbando la barrera y permitiendo el paso de algunos bloques de grandes dimensiones que alcanzaron la zona urbana. Uno de ellos, de 32 m^3 , llegó a colisionar con un taller originando cuantiosos daños materiales.

En el Solà d'Andorra se han ido realizando diversos estudios técnicos y científicos sobre el riesgo de desprendimientos (Euroconsult y Eurogeotècnica, 1994; Copons, 2004; Copons et al., 2005; Copons y Vilaplana, 2008; entre otros). En varios de estos trabajos se incluye la simulación de trayectorias para varias clases de volúmenes de bloques (con un máximo de 10 m^3). El volumen de los desprendimientos se derivó de la distribución corregida del volumen de los bloques medido en parcelas del canchal y del área fuente (Copons, 2004; Copons et al., 2005).

Corominas et al. (2005) realizaron por primera vez una evaluación cuantitativa del riesgo de desprendimientos del Solà d'Andorra, teniendo en cuenta los diferentes factores que intervienen en el mismo, calculando probabilísticamente la peligrosidad e incluyendo específicamente la vulnerabilidad y las posibles pérdidas de edificios y de personas. El cálculo detallado de la vulnerabilidad de edificios se ha analizado recientemente (Mavrouli y Corominas, 2010a y 2010b). En otros trabajos recientes se han abordado con detalle otros aspectos de los desprendimientos como su frecuencia temporal (Moya et al., 2010; Corominas y Moya, 2010) y la distribución de volúmenes de rotura (Santana et al., 2012).

En varios de los trabajos antes mencionados, la simulación de trayectorias y el cálculo de la distribución de energías cinéticas se han realizado suponiendo el desprendimiento de bloques individuales, que no se fragmentan durante su recorrido ladera abajo. La limitación de esta aproximación se hizo evidente a raíz del desprendimiento de abril de 2008 en el Forat Negre, mencionado antes. El inventario del Solà d'Andorra muestra que todos los desprendimientos recientes se han fragmentado y han producido un número variable de bloques que se han acumulado en el canchal (Copons et al., 2005). Por lo tanto, en el Solà

d'Andorra la fragmentación es la norma, no una excepción. Con el fin de simular los desprendimientos de una forma más realista se hace evidente la necesidad de incluir este proceso en la simulación de trayectorias.

3. BASES DEL MÉTODO

Uno de los aspectos a considerar en el proceso de fragmentación es el número y el volumen de los fragmentos resultantes. Corominas et al. (2012) han realizado recientemente una aproximación simplificada a la distribución del volumen de los fragmentos dado un volumen inicial de desprendimiento. La aproximación consiste en el cálculo de dicha distribución con una ley potencial en la que el exponente se supone igual al de la distribución del volumen inicial de los desprendimientos obtenido en la misma zona de estudio.

En esta comunicación se propone un método complementario para obtener el número y el volumen de los bloques que resultan de la fragmentación. La base del método parte de la consideración del proceso de formación de los canchales: 1) los canchales se forman primariamente por la acumulación repetida de desprendimientos al pie de los escarpes rocosos durante un largo periodo de tiempo (centenares a miles de años); 2) si no ha actuado ningún proceso que produzca la reducción del tamaño de los bloques (por ejemplo, gelifración) o su removilización del canchal, los bloques que se encuentran en la superficie de un canchal son los resultantes directamente de los desprendimientos y de la fragmentación de los mismos. En el Solà d'Andorra no se han observado indicios de gelifración de los bloques rocosos que forman los canchales y la única removilización de bloques que ocurre es la debida a desprendimientos posteriores o a deslizamientos superficiales que tienen lugar en la propia zona de acumulación. A partir de dichas observaciones puede inferirse que la distribución estadística del volumen de los bloques observada en el canchal es la que resulta de la fragmentación de los desprendimientos. Lo anterior sugiere que dicha distribución puede utilizarse para obtener el volumen de los fragmentos de desprendimientos. Las hipótesis fundamentales que se han empleado en este trabajo son: a) el volumen de los bloques que resultan de la fragmentación de masas desprendidas de una misma área fuente siguen una distribución de probabilidad determinada; y b) la misma distribución de probabilidad es seguida por el volumen de los bloques que se encuentran en el canchal.

Desde el punto de vista estadístico, la analogía sería que dada una población del volumen de fragmentos, común para todos los desprendimientos ocurridos en una misma zona, cada desprendimiento constituiría una realización aleatoria, una muestra de la población. Bajo esta premisa tiene sentido llevar a cabo el proceso inverso, que de forma ideal sería tomar aleatoriamente bloques del canchal hasta sumar el volumen inicial del desprendimiento. Este proceso es sencillo de simular una vez que es conocida la función de distribución de probabilidad del volumen de los bloques acumulados en el canchal. El procedimiento consiste en utilizar la inversa de dicha función de distribución, una vez ajustada, para generar aleatoriamente volúmenes de fragmentos. Realizando una serie de

simulaciones consecutivas se obtiene un conjunto de bloques, que simula el conjunto de bloques resultantes de un desprendimiento. En cada simulación, el volumen de los bloques simulados se va sumando sucesivamente hasta alcanzar el volumen de la masa rocosa desprendida (el volumen del desprendimiento). El número de los bloques simulados y sumados corresponde al número de bloques resultantes de la fragmentación.

Esta aproximación se ha aplicado al canchal del Solà d'Andorra. Los detalles del procedimiento seguido y los resultados obtenidos se indican a continuación.

4. UN EJEMPLO: APLICACIÓN AL SOLÀ D'ANDORRA

La información de partida son los volúmenes de los bloques medidos en varias estaciones del canchal del Solà d'Andorra, datos que se hallan recopilados en Copons (2004). Concretamente, se han utilizado el volumen correspondiente a 2254 bloques medidos en ocho parcelas y en tres estaciones lineales (parcelas S2 a S9 y estaciones L1 a L3; Figura 2a).

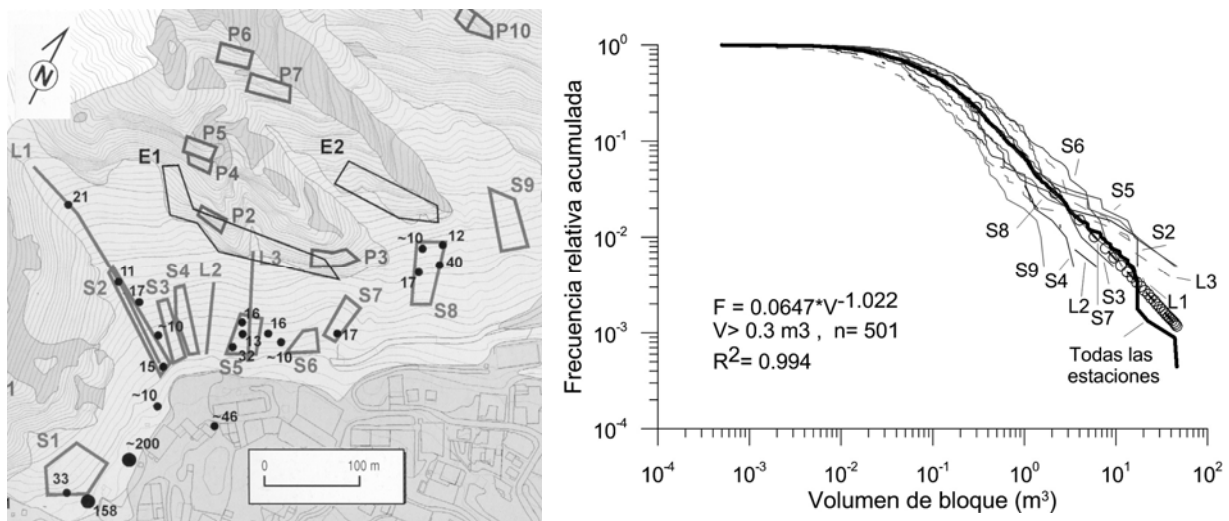


Figura 2. Distribución del volumen de bloques. a) Localización de las estaciones de medida del tamaño de los bloques en el canchal del Solà d'Andorra. Las estaciones de tipo parcela son las que contienen el prefijo S (S1, S2,...), las estaciones de tipo lineal son las que muestran el prefijo L (L1, L2,...) (tomada de Copons, 2004). b) Distribución del volumen de bloques medidos en cada una de las estaciones y en el conjunto de ellas. La línea de círculos marca la línea de regresión ajustada a esta última curva.

Con estos datos se ha hallado la distribución del volumen de los bloques medidos en cada una de las estaciones. Como puede observarse en la Figura 2b, la distribución del volumen de bloques muestra algunas diferencias entre las estaciones. A pesar de estas diferencias, se observa que todas las curvas tienen un trazado rectilíneo a partir de un volumen de 0,1 a 0,5 m³, dependiendo de la curva. Dado que la escala de los ejes es logarítmica, lo anterior significa que la distribución del volumen de los bloques se ajusta bien a un patrón

potencial, a partir de cierto volumen mínimo. Por otra parte, las curvas parecen estar dispuestas en torno a una distribución central que sería representativa de todo el conjunto de observaciones. Por este motivo se ha calculado otra distribución utilizando todos los bloques medidos en las estaciones (línea gruesa de la Figura 2b) y a esta curva se le ha ajustado por regresión la función potencial siguiente:

$$F_b = 0,0647 V_b^{-1,022} \text{ para } V_b \geq 0,3 \text{ m}^3 \quad (1)$$

Dado que la distribución F_b está expresada como una frecuencia relativa acumulada, ésta varía en un rango entre 0 y 1 y es asimilable a una probabilidad (P_b). Por lo tanto, la función de distribución de probabilidad del volumen de los bloques es:

$$P_b = 0,0647 V_b^{-1,022} \text{ para } V_b \geq 0,3 \text{ m}^3 \quad (2)$$

Si, como se ha indicado anteriormente, suponemos que el volumen de los bloques en el canchal (V_b) y el de los bloques que resultan de la fragmentación (V_f) siguen la misma distribución ($P_f = P_b$), el volumen de los fragmentos puede obtenerse invirtiendo la Ecuación 2:

$$V_f = (0,0647/P_f)^{-1/1,022} \quad (3)$$

La simulación de V_f se realiza dando valores a P_f generando números aleatorios de una distribución uniforme con rango entre 0 y 1.

Como se ha mencionado más arriba, dado un volumen del desprendimiento, la simulación de nuevos fragmentos se ha repetido hasta que el volumen acumulado iguala al del desprendimiento, con un cierto exceso o defecto. En la Tabla 1 se muestra un ejemplo de simulación para un desprendimiento con un volumen de 40 m^3 . En este ejemplo, con el bloque simulado número 73 se completa dicho volumen; dicho número se hace corresponder al número de bloques resultantes de la fragmentación. En definitiva, se ha conseguido obtener un conjunto de bloques que estocásticamente puede producirse por la fragmentación de dicho desprendimiento y que puede utilizarse para la simulación de trayectorias.

Número de bloque simulado	P_f	Volumen del bloque (m^3)	Volumen acumulado (m^3)
1	0,085	0,77	0,77
2	0,521	0,13	0,90
3	0,235	0,28	1,18
4	0,824	0,08	1,26
...
71	0,177	0,37	38,06
72	0,453	0,15	38,21
73	0,032	2,02	40,23

Tabla 1. Ejemplo de simulación de volúmenes de bloques resultantes de la fragmentación de un desprendimiento de 40 m^3 .

5. DISCUSIÓN

El método que se propone está basado en la hipótesis que la distribución del volumen de los bloques presentes en el canchal es la misma que la de los bloques que resultan de la fragmentación de los desprendimientos. Dicha hipótesis está apoyada por las observaciones geomorfológicas sobre la formación de canchales y por la ausencia de procesos que, como la gelifración, reduzcan el tamaño de los bloques tras haber sido depositados por los desprendimientos en el canchal, como sucede en el caso del Solà d'Andorra. Sin embargo, es necesario verificar la validez de esta hipótesis de trabajo con datos adicionales. Ello es posible si se dispone de información suficientemente completa sobre desprendimientos ocurridos recientemente. Entre los años 2000 y 2008, en el Solà d'Andorra ocurrieron once desprendimientos destacables que fueron inventariados con detalle en el marco del plan de vigilancia de las laderas rocosas del Gobierno de Andorra. La tipología de los datos y el método de recolección se hayan representados en el trabajo de Copons (2004). Se determinaron el volumen del desprendimiento, mediante la cubicación de la cicatriz de rotura, y el volumen de los bloques desprendidos y acumulados al pie de la ladera, descartando aquellos fragmentos rocosos de diámetro inferior a 20cm. Los volúmenes desprendidos varían generalmente entre los 4 y los 30 m³, alcanzando el mayor los 150 m³. Cabe destacar que, en todos los casos, la masa desprendida se fragmentó en bloques de diverso tamaño, con un máximo de 11 m³.

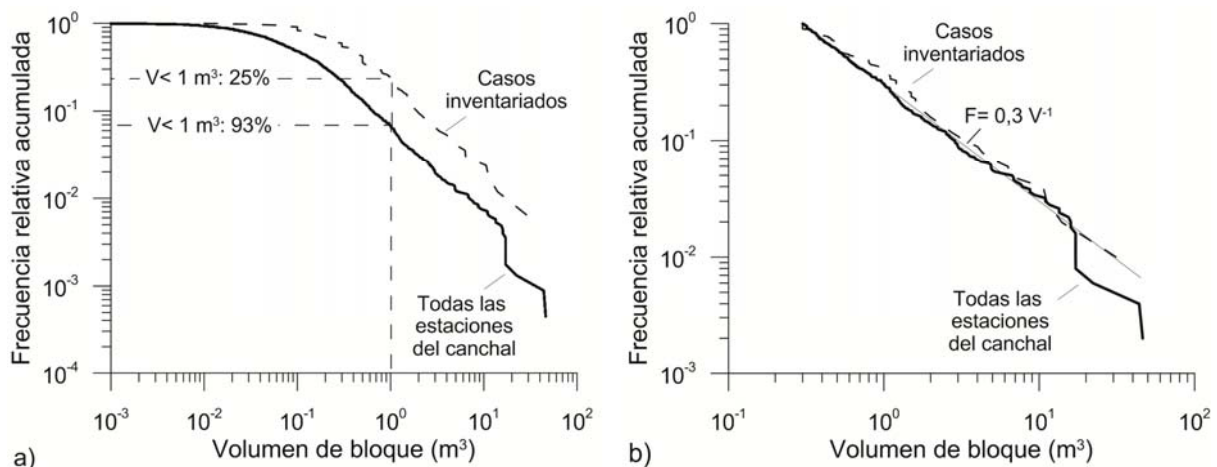


Figura 3. Distribución del volumen de bloques del conjunto de las estaciones del canchal y de los desprendimientos recientes inventariados: a) todos los bloques medidos; b) sólo los de volumen igual o mayor a 0,3m³; la recta corresponde a una distribución potencial que se ajusta a las dos curvas observadas.

Aunque el número de desprendimientos con un inventario suficientemente completo es todavía pequeño, el número total de bloques resultantes de la fragmentación es lo bastante grande (167 bloques) como para permitir la comparación. Se ha elaborado la curva de volumen – frecuencia relativa acumulada de este conjunto de bloques y se ha comparado con la obtenida con el conjunto de estaciones del canchal del Solà d'Andorra, la utilizada

para la simulación (Figura 3). La comparación muestra que la única diferencia entre las dos distribuciones es la menor proporción de bloques pequeños en los casos inventariados (Figura 3a). Por ejemplo, en la distribución correspondiente a las estaciones el porcentaje de bloques menores a 1 m^3 es del 93% mientras que en la correspondiente a los casos inventariados es del 25%. Si se consideran únicamente los bloques de volumen mayor a $0,3 \text{ m}^3$ (Figura 3b), tanto los bloques acumulados en el canchal como los correspondientes al inventario de casos recientes, el ajuste de ambas curvas es muy bueno, indicando que ambas curvas siguen una misma distribución de probabilidad, como se había supuesto. Dicha distribución corresponde a una ley potencial con exponente próximo a la unidad y un parámetro de escala en torno a 0,3 (Figura 3b).

Una consideración final parte del hecho que, analizando canchales de varias regiones montañosas, en algunos casos puede observarse un aumento del tamaño de los bloques canchal abajo. Este fenómeno es muy claro en algunos sitios pero no es tan manifiesto en otros, como en el Solà d'Andorra. La segregación de bloques en función de su tamaño es la consecuencia natural del mayor alcance cuanto mayor es el peso de un bloque. La fragmentación del desprendimiento parece dificultar esta segregación, aunque sin eliminarla. Cierta segregación se ha observado en algunos desprendimientos recientes inventariados en el Solà d'Andorra, en los que la masa desprendida se ha fragmentado. En cualquier caso, la posible segregación de bloques tiene implicaciones en la aplicación del método propuesto en esta comunicación. Es necesario evitar un sesgo en el muestreo, en el que los bloques más grandes estén sub-representados. En canchales donde la segregación de bloques es observable, las estaciones de muestreo tienen que distribuirse a diferentes alturas en la zona de acumulación de bloques (muestreo de tipo estratificado), o bien incluir toda ella como en las estaciones lineales, y la segregación de bloques ha de ser corregida.

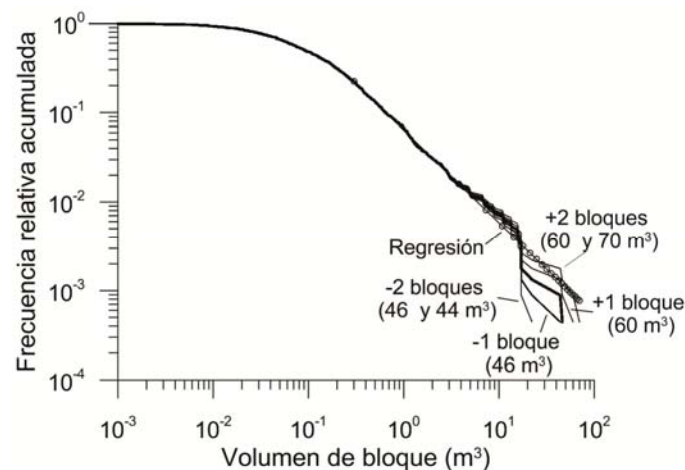


Figura 4. Distribución del volumen de bloques del conjunto de las estaciones del canchal (línea gruesa) y de muestras a las que se han quitado o añadido uno o dos bloques grandes. La línea de círculos muestra la regresión realizada con la muestra original.

Cabe decir que un muestreo que incluya un gran número de muestras, como el utilizado en este trabajo (con más de 2000 bloques), proporciona una distribución poco sensible a la falta de algunos bloques muy grandes. A modo de ejemplo de esto último, al conjunto original de bloques medido en el canchal del Solà d'Andorra, por un lado, se han quitado los dos bloques de mayor volumen (de 44 y 46 m³) y, por otro lado, se han añadido otros dos (de 60 y 70 m³) (Figura 4). Obviamente, sólo el extremo de la distribución varía entre los diversos casos y la regresión ajustada no cambia prácticamente entre ellos porque la parte central de las curvas es la que controla esencialmente el ajuste. De hecho, la curva que contiene dos bloques añadidos es más cercana a la regresión ajustada al conjunto de datos original, sugiriendo que pueden faltar algunos bloques grandes en la muestra. En la simulación del volumen de bloques se ha utilizado la distribución obtenida por regresión, lo que permite minimizar la ausencia de unos pocos bloques grandes en la muestra.

6. CONCLUSIONES

En la simulación de la trayectoria de desprendimientos es necesario incluir el proceso de fragmentación. Algunas de las variables a determinar en este proceso son el número y el volumen de los fragmentos grandes (de tamaño bloque).

Dado un volumen de desprendimiento, esas dos variables pueden estimarse a partir de la distribución del volumen de los bloques que se encuentran en la zona de deposición (canchal). Una vez determinada dicha distribución, el procedimiento consiste en la simulación de volúmenes utilizando la función inversa a la distribución de probabilidad.

La hipótesis básica supone que el volumen de los bloques que hay en el canchal, depositados por desprendimientos pasados, y el de los que resultan de la fragmentación siguen la misma distribución, siempre y cuando no haya actuado algún proceso que reduzca el tamaño de los bloques tras su deposición. La validez de la hipótesis se ha comprobado en el Solà d'Andorra comparando la distribución del volumen de bloques obtenida en el canchal con la de bloques resultantes de la fragmentación de desprendimientos inventariados.

Se concluye, en definitiva, que el método propuesto puede ser aplicado a zonas en las que los bloques no han sufrido una reducción de tamaño (por ejemplo, por gelifracción) con posterioridad a su deposición por desprendimiento.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto Safeland de la Comisión Europea (contrato 226479) y por el proyecto Big Risk de la CICYT (contrato BIA2008-06614). El Departamento de Ordenación del Territorio del Gobierno de Andorra está llevando a cabo el inventario de desprendimientos, parte de los cuales se han utilizado en el presente estudio.

REFERENCIAS

- Agliardi, F. and Crosta, G.B., 2003. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40: 455-471.
- Agliardi, F., Crosta, G.B. and Frattini, P., 2009. Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9: 1059-1073.
- Bourrier, F., Dorren, L., Nicot, F., Berger, F. and Darve, F., 2009. Toward objective rockfall trajectory simulation using a stochastic impact model. *Geomorphology*, 110: 68-79.
- Copons, R., 2004. *Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs rocosos al Solà d'Andorra la Vella*. Ph.D. thesis, Dpt. de Geodinàmica i Geofísica, Universitat de Barcelona. Editada en Monografies del CENMA, 2007, 211 pp.
- Copons, R. and Vilaplana, J.M., 2008. Rockfall susceptibility zoning at a large scale: from geomorphological inventory to preliminary land use planning. *Engineering Geology*, 102: 142-151.
- Copons, R., Vilaplana, J.M., Corominas, J., Altimir, J. and Amigó, J., 2005. Rockfall risk management in high density urban areas. The Andorran experience. In: T. Glade, M. Anderson and M.J. Crozier (Editors), *Landslide hazard and risk*. Wiley, New York, pp. 675-698.
- Corominas, J., Copons, R., Moya, J., Vilaplana, J.M., Altimir, J. and Amigó, J., 2005. Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area. *Landslides*, 2: 343-357.
- Corominas, J. and Moya, J., 2010. Contribution of dendrochronology to the determination of magnitude-frequency relationships for landslides. *Geomorphology*, 124: 137-149.
- Corominas, J., Mavrouli, O.C., Santana, D. and Moya, J., 2012. Simplified approach for obtaining the block volume distribution of fragmental rockfalls. In: E. Eberhardt, C. Froese, A. Keith Turner and S. Leroueil (Editors), *Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding*. 11th International & 2nd North American Symposium on Landslides, Banff, Canada, 2: 1159-1164.
- Dorren L.K.A., Berger, F. and Putters, U.S., 2006. Real size experiments and 3D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6: 145-153.
- Euroconsult y Eurogeotècnica, 1994. Estudi de la zonificació i caracterització de la problemàtica del terreny a la Parròquia d'Andorra la Vella. Comú d'Andorra la Vella. Informe inédito.
- Giacomini, A., Buzzi, O., Renard, B. and Giani, G.P., 2009. Experimental studies on fragmentation of rock falls on impact with rock surfaces. *Int J Rock Mech Min Sci*, 46:708-715.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., and Wieczorek, G.F., 2003. Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3: 491-503.
- Hungr, O., Evans, S.G. and Hazzard, J., 1999. Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of south-western British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 36: 224-238.
- Li, Z. H., Huang, H. W., Xue, Y. D. and Yin, J., 2009. Risk assessment of rockfall hazards on highways. *Georisk*, 3: 147-154.
- Mavrouli, O.C. and Corominas, J., 2010a. Vulnerability of simple reinforced concrete buildings to damage by rockfalls. *Landslides* 7:169-180.
- Mavrouli O.C. and Corominas, J., 2010b. Rockfall vulnerability assessment for reinforced concrete buildings. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10: 2055-2066.

- Moya, J., Corominas, J., Pérez Arcas, J. and Baeza, C., 2010. Tree-ring based assessment of rockfall frequency on talus slopes at Solà d'Andorra, Eastern Pyrenees. *Geomorphology*, 118: 393-408.
- Nocilla, N., Evangelista, A. and Scotto di Santolo, A., 2009. Fragmentation during Rock Falls: Two Italian Case Studies of Hard and Soft Rocks. *Rock Mech Rock Eng*, 42: 815-833,
- Santana, D., Corominas, J, Mavrouli O.C. and García-Sellés, D., 2012. Magnitude–frequency relation for rockfall scars using a Terrestrial Laser Scanner. *Engineering Geology*, 145–146: 50-64.
- Scioldo, G., 2006. User guide ISOMAP & ROTOMAP — 3D surface modelling and rockfall analysis. Geo&Soft International.
- Wang. Y. and Tonon, F., 2010. Discrete Element Modeling of Rock Fragmentation upon Impact in Rock Fall Analysis. *Rock Mech Rock Eng* , 44: 23-35.